

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA
DE MATERIAIS**

RAFAEL GOMES KÖNIG

**ESTUDO DO DESGASTE DE REVESTIMENTOS EM MATRIZES DE
RECORTE A FRIO DE CABEÇAS DE PARAFUSOS**

**FLORIANÓPOLIS
2007**

RAFAEL GOMES KÖNIG

**ESTUDO DO DESGASTE DE REVESTIMENTOS EM MATRIZES DE
RECORTE A FRIO DE CABEÇAS DE PARAFUSOS**

Dissertação submetida à Universidade
Federal de Santa Catarina para a obtenção
do título de Mestre em Ciência e
Engenharia dos Materiais

Área de Concentração: Ciência e
Engenharia dos Materiais

Orientador: Prof. D. Sc. Carlos Augusto
Silva de Oliveira

FLORIANÓPOLIS
2007

Rafael Gomes König

**ESTUDO DO DESGASTE DE REVESTIMENTOS EM MATRIZES DE
RECORTE A FRIO DE CABEÇAS DE PARAFUSOS**

Dissertação submetida à Universidade
Federal de Santa Catarina para a obtenção
do título de Mestre em Ciência e
Engenharia dos Materiais

Área de Concentração: Ciência e
Engenharia dos Materiais

Aprovada em:

Profa. Ana Maria Maliska, Dr. Eng.
Coordenadora do Programa

Prof. Carlos Augusto Silva de Oliveira, D. Sc.
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Augusto José de A. Buschinelli, Dr. Ing. – EMC/UFSC
(Presidente)

Prof. Carlos E. Niño Bohórquez, Dr. Eng. Mec. – EMC/UFSC
(Membro)

Prof. Walter Lindolfo Weingaetner, Dr. Ing – EMC/UFSC
(Membro)

A meus pais, José e Sônia.

A minha irmã, Larissa.

Ao amor da minha vida, minha esposa Tatiana.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. D. Sc. Carlos Augusto Silva de Oliveira, Universidade Federal de Santa Catarina, pelo apoio, incentivo e orientação, imprescindíveis para a realização deste trabalho.

A Ciser Parafusos e Porcas pela oportunidade e generosidade durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Msc. Leônidas Cayo Mamani Gilapa, Sociedade Educacional de Santa Catarina (SOCIESC), pela orientação e liberação do equipamento de ensaio de desgaste pino-sobre-disco.

Ao Tecnólogo Guilherme Eboni e ao Sr. Noel Alves Rodrigues, Brasimet Comércio e Indústria S.A., pela deposição dos revestimentos nas ferramentas e nos corpos de prova.

Ao Tecnólogo Jackson Ferreira Dal Comuni, Ciser Parafusos e Porcas, pela amizade e ajuda na execução dos ensaios laboratoriais de desgaste.

Ao Técnico Mecânico Márcio de Almeida Ribeiro, Ciser Parafusos e Porcas, pelo acompanhamento das ferramentas durante o processo produtivo.

Ao Sr. Osmar Klann, Ciser Parafusos e Porcas, pelo cuidado na preparação das ferramentas.

A minha família, pelo apoio e incentivo.

RESUMO

Este trabalho apresenta a influência dos revestimentos sobre a resistência ao desgaste de matrizes de recorte utilizadas para a conformação mecânica a frio de parafusos sextavados. A abrasão é o mecanismo básico de desgaste predominante no processo de conformação estudado, promovido pelo atrito entre a matéria-prima e as faces de contato da ferramenta. Foram analisadas matrizes de recorte revestidas com três diferentes tipos de revestimentos das superfícies de trabalho: nitreto de titânio, carbonitreto de titânio e nitreto de cromo, aplicados pelo processo de Deposição Física de Vapor (P.V.D.). O desgaste destas ferramentas foi acompanhado em escala industrial traçando-se as curvas de evolução do desgaste na conformação de dois aços comumente utilizados na fabricação de elementos de fixação, o SAE 1015 e o SAE 1038. As superfícies de corpos de prova padronizados foram revestidas com os mesmos revestimentos aplicados nas matrizes de recorte e submetidos a dois diferentes ensaios laboratoriais de desgaste, segundo as normas ASTM G65 – Ensaio de Desgaste Disco de Borracha-Areia Abrasiva e ASTM G99 – Ensaio de Desgaste Pino-sobre-Disco. A obtenção de informações sobre o desgaste das ferramentas em condições industriais e laboratoriais permitiu a comparação do desempenho dos revestimentos em função das propriedades mecânicas dos aços conformados. O revestimento de carbonitreto de titânio, em todos os testes realizados, proporcionou as menores taxas de desgaste, seguido pelo nitreto de cromo e pelo nitreto de titânio.

Palavras-chave: Abrasão; conformação mecânica; matrizes de recorte; revestimentos.

ABSTRACT

This work presents the effect of hard coatings on wear of trim dies used in cold forging of hexagon head screws. Abrasion is the principal wear mechanism at cold forging process studied, due friction between raw material and contact faces of tool. Trim dies were coated with three different types of hard coatings: titanium nitride, titanium carbonitride and chromium nitride, applied by Physical Vapour Deposition (P.V.D.) process. These tools were tested in industrial scale, drawing the evolution curves of wear during cold forging of two steels usually used in manufacturing of fasteners, SAE 1015 and SAE 1038. Standard test specimens were coated with the same hard coatings applied on trim dies and submitted to two different wear laboratorial tests, according to ASTM G65 – Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand-Rubber Wheel Apparatus and ASTM G99 – Standard Test Method for Wear with a Pin-on-Disk Apparatus. Information about wear of trim dies at industrial and laboratorial conditions allowed the comparison of hard coatings performance with mechanical properties of cold forging steels. The hard coating titanium carbonitride, for all testing, allowed the smallest wear rates, followed by chromium nitride and titanium nitride.

Keywords: Abrasion; cold forging; trim dies; hard coatings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Representação esquemática das micro-camadas de uma superfície metálica (DE MELLO, 1994).....	04
Figura 2.2	Representação esquemática tridimensional das irregularidades microscópicas de uma superfície (STROKES, 2003).....	05
Figura 2.3	Representação esquemática da formação do perfil superficial (STROKES, 2003).....	06
Figura 2.4	Parâmetros tribológicos que afetam o desgaste (DE MELLO, 1994).....	10
Figura 2.5	Representação esquemática dos elementos de um tribossistema (ZUM GAHR, 1987).....	13
Figura 2.6	Classificação dos processos de desgaste de acordo com o tipo de movimento entre as superfícies (ZUM GAHR, 1987).....	14
Figura 2.7	Classificação dos processos de desgaste, em função das interações mecânicas entre os corpos, segundo Hokkirigawa <i>et al.</i> (1998 <i>apud</i> MARU, 2003).....	16
Figura 2.8	Mecanismos de desgaste, conforme DIN 50320 (BRANKOVIC, 1998).....	18
Figura 2.9	Aspecto superficial de um componente que sofreu desgaste abrasivo (DESGASTE, 2005).....	20
Figura 2.10	Exemplos de tribossistemas submetidos ao mecanismo de desgaste abrasivo (BRANKOVIC, 1998).....	21
Figura 2.11	Desgaste abrasivo como função da relação entre a dureza das partículas abrasivas e da dureza da superfície em desgaste (ZUM GAHR, 1987).....	22
Figura 2.12	A: Abrasão entre dois corpos; B: Abrasão entre três corpos (BRANKOVIC, 1998).....	23
Figura 2.13	Representação esquemática dos micro-mecanismos abrasivos (ZUM GAHR, 1987).....	24
Figura 2.14	Micrografias de interações entre partículas abrasivas minerais e superfícies de aço: (a)Micro-sulcamento; (b)Micro-corte e (c)Micro-lascamento (BRANKOVIC, 1998).....	25
Figura 2.15	Micrografias de ferro Armco com diferentes ângulos de ataque da partícula abrasiva: (a)30°; (b)60° e (c)90° (ZUM GAHR, 1987).....	25

Figura 2.16	Razão entre micro-corte e micro-sulcamento como função da razão entre o ângulo de ataque e o ângulo de ataque crítico (ZUM GAHR, 1987).....	26
Figura 2.17	Riscos de desgaste sendo interrompidos por carbonetos de nióbio na face de contato de um anel de ferro fundido nodular (TOMANIK, 2000).....	27
Figura 2.18	Componente submetido ao mecanismo de desgaste adesivo (DESGASTE, 2005).....	28
Figura 2.19	Matriz de estampagem a frio de porcas sextavadas apresentando severo desgaste adesivo (CISER, 2005).....	28
Figura 2.20	Ruptura das junções por adesão: (1)Na interface; (2)No material A, de resistência mais baixa; (3)Predominantemente no material A, de resistência mais baixa, mas também no material B e (4)Em partes iguais, nos materiais A e B (ZUM GAHR, 1987).....	29
Figura 2.21	Variação do coeficiente de adesão em função da dureza e estrutura cristalina dos metais (SIKORSKI, 1964).....	30
Figura 2.22	Representação esquemática dos mecanismos de adesão, segundo Kinloch (ZUM GAHR, 1987).....	31
Figura 2.23	Representação esquemática da formação da dupla camada de cargas elétricas na interface do substrato (ZUM GAHR, 1987).....	31
Figura 2.24	Modelo de transferência de elétrons proposto por Derjaguin e Smilga (ZUM GAHR, 1987).....	32
Figura 2.25	Representação esquemática das configurações dos principais ensaios de desgaste (BAYER, 1985).....	35
Figura 2.26	Fatores de aumento da vida de brocas para a usinagem de diversos materiais obtidos através da comparação entre a vida de ferramentas sem a aplicação de revestimentos e ferramentas revestidas com TiN (STRAFFORD, 1996).....	39
Figura 2.27	Comparativo entre a evolução do desgaste de ferramentas de conformação mecânica com e sem a aplicação de revestimentos, avaliada através da altura da rebarba formada (STRAFFORD, 1996).....	40
Figura 2.28	Espessuras de camada e temperaturas de aplicação de algumas técnicas de modificação superficial (DESGASTE, 2005).....	41
Figura 2.29	Representação esquemática do processo de evaporação em vácuo (PASCHOAL, 1998).....	45
Figura 2.30	Representação esquemática do processo de desintegração catódica (PASCHOAL, 1998).....	46

Figura 2.31	A: Deposição catódica convencional; B: <i>Magnetron Sputtering</i> (PASCHOAL, 1998).....	48
Figura 2.32	Representação esquemática do processo de deposição iônica (WICK; VEILLEUX, 1986).....	50
Figura 2.33	Representação esquemática das duas principais configurações para a formação das camadas dos revestimentos (CAMPOS JR., 2001 <i>apud</i> DAL COMUNI; FAGUNDES, 2004).....	54
Figura 3.1	Vista frontal e vista lateral de uma matriz de recorte (CISER, 2006).....	55
Figura 3.2	Representação esquemática da sequência de conformação de um parafuso sextavado (PADRÃO DE PRODUÇÃO 547/2, 2005).....	56
Figura 3.3	Representação da distância entre faces da cabeça sextavada (PADRÃO DE PRODUÇÃO 547/2, 2005).....	62
Figura 3.4	Configurações geométricas do pino e do disco utilizados no ensaio de desgaste (DAL COMUNI; FAGUNDES, 2004).....	64
Figura 3.5	Equipamento utilizado para a realização do ensaio de desgaste pino-sobre-disco (DAL COMUNI; FAGUNDES, 2004).....	65
Figura 3.6	Representação esquemática do princípio de funcionamento do ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva (ASTM G 65, 1991).....	67
Figura 3.7	Equipamento utilizado para a realização do ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva.....	68
Figura 4.1	Histograma dos valores de microdureza dos revestimentos.....	73
Figura 4.2	Padrões de falha de adesividade de camada segundo a escala HF (HEINKE <i>et al</i> , 1995).....	75
Figura 4.3	Micrografias das indentações realizadas nos corpos de prova revestidos com nitreto de titânio: (a)15 kgf (50x), (b)30 kgf(50x) e (c)45 kgf(50x).....	76
Figura 4.4	Micrografias das indentações realizadas nos corpos de prova revestidos com nitreto de cromo: (a)15 kgf (100x), (b)30 kgf(50x) e (c)45 kgf(50x).....	77
Figura 4.5	Micrografias das indentações realizadas nos corpos de prova revestidos com carbonitreto de titânio: (a)15 kgf(100x), (b)30 kgf(50x) e (c)45 kgf(50x).....	78
Figura 4.6	Micrografia da camada limite da matriz de recorte com revestimento de carbonitreto de titânio.....	79
Figura 4.7	Micrografia da camada limite da matriz de recorte com revestimento de nitreto de cromo.....	80

Figura 4.8	Micrografia da camada limite da matriz de recorte com revestimento de nitreto de titânio.....	81
Figura 4.9	Microestrutura temperada e revenida das matrizes de recorte revestidas com nitreto de titânio, obtida por microscopia óptica.....	81
Figura 4.10	Microestrutura temperada e revenida das matrizes de recorte revestidas com carbonitreto de titânio, obtida por microscopia óptica.....	82
Figura 4.11	Microestrutura temperada e revenida das matrizes de recorte revestidas com nitreto de cromo, obtida por microscopia óptica.....	83
Figura 4.12	Alinhamento dos carbonetos primários para diferentes graus de deformação (crescentes de “a” para “d”) do aço AISI M2 (HOYLE, 1988 <i>apud</i> DA SILVA, 2001).....	83
Figura 4.13	Distribuição dos carbonetos primários na matriz do aço AISI M2 (DA SILVA, 2001).....	84
Figura 4.14	Evolução da perda volumétrica dos pinos durante o ensaio de desgaste pino-sobre-disco.....	86
Figura 4.15	Evolução da perda volumétrica dos corpos de prova durante o ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva.....	89
Figura 4.16	Evolução da perda volumétrica dos corpos de prova em 120 segundos do ensaio.....	90
Figura 4.17	Desgaste médio das matrizes de recorte revestidas com nitreto de titânio para o aço SAE 1015.....	93
Figura 4.18	Desgaste médio das matrizes de recorte revestidas com nitreto de cromo para o aço SAE 1015.....	94
Figura 4.19	Desgaste médio das matrizes de recorte revestidas com carbonitreto de titânio para o aço SAE 1015.....	95
Figura 4.20	Desgaste médio da camada de revestimento das matrizes de recorte revestidas com nitreto de titânio para o aço SAE 1015.....	96
Figura 4.21	Desgaste médio da camada de revestimento das matrizes de recorte revestidas com nitreto de cromo para o aço SAE 1015.....	96
Figura 4.22	Desgaste médio da camada de revestimento das matrizes de recorte revestidas com carbonitreto de titânio para o aço SAE 1015.....	97
Figura 4.23	Desgaste médio do substrato das matrizes de recorte revestidas com nitreto de titânio para o aço SAE 1015.....	98

Figura 4.24	Desgaste médio do substrato das matrizes de recorte revestidas com nitreto de cromo para o aço SAE 1015.....	98
Figura 4.25	Desgaste médio do substrato das matrizes de recorte revestidas com carbonitreto de titânio para o aço SAE 1015.....	99
Figura 4.26	Desgaste médio das matrizes de recorte revestidas com nitreto de titânio para o aço SAE 1038.....	100
Figura 4.27	Desgaste médio das matrizes de recorte revestidas com nitreto de cromo para o aço SAE 1038.....	101
Figura 4.28	Desgaste médio das matrizes de recorte revestidas com carbonitreto de titânio para o aço SAE 1038.....	101
Figura 4.29	Desgaste médio da camada de revestimento das matrizes de recorte revestidas com nitreto de titânio para o aço SAE 1038.....	102
Figura 4.30	Desgaste médio da camada de revestimento das matrizes de recorte revestidas com nitreto de cromo para o aço SAE 1038.....	102
Figura 4.31	Desgaste médio da camada de revestimento das matrizes de recorte revestidas com carbonitreto de titânio para o aço SAE 1038.....	103
Figura 4.32	Desgaste médio do substrato das matrizes de recorte revestidas com nitreto de titânio para o aço SAE 1038.....	104
Figura 4.33	Desgaste médio do substrato das matrizes de recorte revestidas com nitreto de cromo para o aço SAE 1038.....	104
Figura 4.34	Desgaste médio do substrato das matrizes de recorte revestidas com carbonitreto de titânio para o aço SAE 1038.....	105
Figura 4.35	Representação esquemática da operação de recorte do sextavado, destacando o afastamento entre punção e matriz.....	107
Figura 4.36	Comparativo de desgaste das matrizes de recorte revestidas com nitreto de titânio para os aços SAE 1015 e SAE 1038.....	108
Figura 4.37	Comparativo de desgaste das matrizes de recorte revestidas com nitreto de cromo para os aços SAE 1015 e SAE 1038.....	109
Figura 4.38	Comparativo de desgaste das matrizes de recorte revestidas com carbonitreto de titânio para os aços SAE 1015 e SAE 1038.....	109
Figura 4.39	Comparativo de desgaste das matrizes de recorte revestidas com nitreto de titânio, nitreto de cromo e carbonitreto de titânio para o aço SAE 1015.....	110

Figura 4.40	Comparativo de desgaste das matrizes de recorte revestidas com nitreto de titânio, nitreto de cromo e carbonitreto de titânio para o aço SAE 1038.....	111
Figura 8.1	Representação esquemática da sequência de conformação de um parafuso sextavado (PADRÃO DE PRODUÇÃO 547/2, 2005).....	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Classificação dos processos de desgaste em função do dano causado (SERBINO, 2005).....	15
Tabela 2.2	Classificações dos mecanismos de desgaste (ZUM GAHR, 1987).....	17
Tabela 2.3	Influência das características dos materiais no desgaste abrasivo (EKBERG, 1997).....	21
Tabela 2.4	Influência de outros elementos do tribosistema no desgaste abrasivo (EKBERG, 1997).....	22
Tabela 2.5	Diferentes grupos de materiais e suas principais ligações (ZUM GAHR, 1987).....	33
Tabela 2.6	Principais tratamentos termoquímicos e suas aplicações (TRATAMENTO, 2005).....	42
Tabela 2.7	Propriedades estruturais, mecânicas e térmicas de materiais utilizados em revestimentos duros (HULTMAN; SUNDGREN, 2001 <i>apud</i> TSCHIPTSCHIN, 2004).....	51
Tabela 2.8	Propriedades dos revestimentos analisados neste trabalho (DUROTIN, 2004).....	51
Tabela 2.9	Valores de microdureza disponíveis na literatura para os revestimentos analisados neste trabalho.....	52
Tabela 3.1	Composição química média do aço rápido AISI M2 (VILLARES METALS, 2003).....	56
Tabela 3.2	Composição química dos aços SAE 1015 e SAE 1038 (SAE J 403, 1995).....	57
Tabela 3.3	Principais propriedades mecânicas, referentes à conformação, dos aços SAE 1015 e SAE 1038 (NBR NM 202, 2000).....	57
Tabela 3.4	Composição química do aço SAE 1075 (SAE J 403, 1995).....	58
Tabela 4.1	Resultados dos ensaios de tração e dureza das amostras de matéria-prima.....	70
Tabela 4.2	Dureza do substrato dos corpos de prova utilizados no ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva.....	71
Tabela 4.3	Dureza do substrato dos corpos de prova utilizados no ensaio de desgaste pino-sobre-disco.....	71

Tabela 4.4	Dureza do substrato das matrizes de recorte avaliadas durante o processo produtivo.....	72
Tabela 4.5	Valores médios e desvio padrão dos resultados dos ensaios de microdureza.....	74
Tabela 4.6	Classificação das falhas de adesividade de camada ao substrato em função das cargas aplicadas.....	78
Tabela 4.7	Valores de rugosidade obtidos após o processo de fabricação dos discos.....	84
Tabela 4.8	Perda volumétrica média dos pinos durante a realização do ensaio de desgaste pino-sobre-disco.....	85
Tabela 4.9	Perda volumétrica média dos corpos de prova durante a realização do ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva.....	88
Tabela 4.10	Resultados experimentais de ensaios de desgaste encontrados por diferentes autores.....	91
Tabela 4.11	Resultados do acompanhamento em escala industrial das matrizes de recorte para o aço SAE 1015.....	92
Tabela 4.12	Resultados do acompanhamento em escala industrial das matrizes de recorte para o aço SAE 1038.....	100
Tabela 4.13	Resumo dos resultados do acompanhamento em escala industrial das matrizes de recorte.....	106
Tabela 4.14	Comparativo dos resultados obtidos nos ensaios de desgaste e no acompanhamento industrial.....	112
Tabela 8.1	Propriedades mecânicas dos aços SAE 1015 e SAE 1038 utilizadas no cálculo das tensões de conformação (NEDSCHROEF HERENTALS, 1998)...	140
Tabela 8.2	Resultados do cálculo das tensões σ_{AD} atuantes no ensaio de adesividade de camada.....	142

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 Análise de Superfícies Metálicas	19
2.2 Atrito.....	22
2.3 Desgaste	25
2.4 Tribologia	27
2.5 Tribosistema.....	28
2.6 Processos de Desgaste	30
2.7 Classificação dos Mecanismos de Desgaste	32
2.7.1 Abrasão	35
2.7.2 Adesão	43
2.8 Ensaio de Desgaste	50
2.8.1 Elementos dos Ensaio de Desgaste	52
2.9 Revestimentos de Superfícies.....	54
2.9.1 Deposição Física de Vapor (P.V.D.)	58
2.9.1.1 Técnicas de Aplicação	60
2.9.1.1.1 Deposição por Evaporação em Vácuo.....	60
2.9.1.1.2 Desintegração Catódica	62
2.9.1.1.3 Deposição Iônica	64
2.9.1.2 Propriedades dos Revestimentos.....	66
3 METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	71
3.1 Metodologia Experimental.....	71
3.2 Procedimentos Experimentais.....	75
3.2.1 Ensaio de tração.....	75
3.2.2 Dureza.....	76
3.2.3 Microdureza.....	76
3.2.4 Adesividade de Camada	77
3.2.5 Caracterização Microestrutural.....	77
3.2.6 Avaliação do Desgaste das Matrizes de Recorte	78
3.2.7 Ensaio de Desgaste Pino-sobre-Disco	79
3.2.8 Ensaio de Desgaste Disco de Borracha-Areia Abrasiva.....	82

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	86
4.1 Análise dos Arames	86
4.2 Dureza.....	86
4.3 Microdureza	88
4.4 Adesividade de Camada.....	90
4.5 Caracterização Microestrutural.....	94
4.6 Ensaio de Desgaste Pino-sobre-Disco.....	99
4.7 Ensaio de Desgaste Disco de Borracha-Areia Abrasiva.....	102
4.8 Avaliação do Desgaste das Matrizes de Recorte	106
4.8.1 Desgaste das Matrizes de Recorte na Conformação do Aço SAE 1015	106
4.8.2 Desgaste das Matrizes de Recorte na Conformação do Aço SAE 1038	114
4.8.3 Comparação dos Resultados	120
5 CONCLUSÕES	128
6 SUGESTÕES	130
7 REFERÊNCIAS.....	131
8 APÊNDICE A	137
8.1 Cálculo das Tensões no Ensaio de Desgaste Disco de Borracha-Areia Abrasiva.....	137
8.2 Cálculo das Tensões no Ensaio de Desgaste Pino-sobre-Disco	137
8.3 Cálculo das Tensões de Conformação no Recorte do Sextavado.....	138
8.4 Cálculo das Tensões no Ensaio de Adesividade de Camada.....	141
8.5 Referências	142

1 INTRODUÇÃO

O desgaste de ferramentas e de componentes influencia diretamente a produtividade e a eficiência dos equipamentos e dos processos de manufatura (BRESSAN; HESSE; SILVA JR., 2001). Tendo em vista que a tendência atual de mercado é o aumento na produtividade, utilizando-se processos mais confiáveis e que garantam a qualidade do produto final, a redução dos efeitos associados ao desgaste torna-se fator primordial para o aumento da competitividade das indústrias.

A demanda por componentes mais resistentes ao desgaste e à corrosão tem promovido um interesse crescente pela Engenharia de Superfícies (PINEDO, 2004). Os tratamentos de superfícies promovem alterações significativas nas propriedades mecânicas, térmicas e químicas das ferramentas (SINATORA; TSCHIPTSCHIN, 2004). As propriedades mecânicas mais freqüentemente aumentadas são as resistências à fadiga e ao desgaste. Quanto às propriedades térmicas, buscam-se revestimentos que funcionem como barreiras térmicas ou, em outros casos, aqueles que aumentem a transferência de calor, dependendo da aplicação do componente. Como propriedade química busca-se, basicamente, o aumento da resistência à corrosão.

As indústrias do setor metal-mecânico utilizam técnicas de modificação das superfícies de ferramentas de conformação mecânica, injeção e corte sujeitas ao desgaste e corrosão intensos, em função do processo e meio em que trabalham.

Nos processos de conformação, o coeficiente de atrito entre a matriz e o material que está sendo conformado deve ser o menor possível, a fim de reduzir a força de atrito e conseqüentemente a força e trabalho necessários para a conformação. Além disso, o material deformado flui mais facilmente, favorecendo a fabricação de peças mais complexas. Os tratamentos de superfícies com revestimentos duros, possibilitam a obtenção de baixos

coeficientes de atrito, proporcionando um incremento no desempenho de matrizes e punções de conformação.

O emprego de ferramentas com superfícies revestidas possibilita aumento na eficiência dos processos produtivos, refletindo no aumento da vida das ferramentas, no menor número de *setups* e na redução da ocorrência de falhas e paradas indesejadas da produção. Além disso, obtém-se um produto de melhor qualidade e acabamento. Diante destas vantagens, os custos inerentes à aplicação dos revestimentos são compensados, estabelecendo uma relação custo-benefício favorável.

O presente trabalho avaliou a resistência ao desgaste de ferramentas e corpos de prova com três diferentes revestimentos. As ferramentas analisadas foram matrizes de recorte para a conformação mecânica a frio de parafusos sextavados. Foram utilizados o nitreto de titânio, o carbonitreto de titânio e o nitreto de cromo, aplicados pelo processo de Deposição Física de Vapor (P.V.D.).

O desempenho das ferramentas foi acompanhado em condições de trabalho, durante a conformação de dois aços comumente utilizados como matéria-prima na fabricação de fixadores, visando obter a evolução do desgaste em função das propriedades mecânicas destes aços.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A falha de um componente ou estrutura pode estar associada aos danos causados por quatro mecanismos fundamentais: a deformação plástica, a formação e propagação de trincas, a corrosão ou o desgaste (ZUM GAHR, 1987). Um componente se deforma elasticamente sob um carregamento e quando está subdimensionado pode-se deformar plasticamente e não exercer mais as funções para as quais foi projetado. A nucleação e propagação de trincas podem levar componentes e estruturas à falhas catastróficas. A corrosão e o desgaste são mecanismos que causam danos à superfície dos componentes.

Os mecanismos de desgaste serão abordados com maior ênfase nas próximas seções deste capítulo. Será realizada uma análise dos mecanismos básicos de desgaste, considerando-se que o seu entendimento é fundamental para a sua minimização.

Tendo em vista que o objetivo principal do presente trabalho é estudar os efeitos dos revestimentos na resistência ao desgaste, faz-se necessária também a apresentação da literatura referente aos benefícios inerentes à utilização desta técnica de modificação superficial.

2.1 Análise de Superfícies Metálicas

Os componentes mecânicos e de estruturas não dependem exclusivamente das propriedades dos materiais dos quais são fabricados para desempenhar as funções para as quais foram projetados. A forma geométrica e as características de suas superfícies são fundamentais para a obtenção de um bom rendimento em serviço, principalmente componentes expostos a solicitações mecânicas que levam ao seu desgaste.

As características das superfícies de trabalho de componentes mecânicos têm um efeito significativo nas condições de serviço e na sua vida. As superfícies de um componente são selecionadas com base na sua aparência, na sua textura ou na sua cor; porém, componentes mecânicos funcionais demandam uma minuciosa análise devido à necessidade de desempenho adequado, mesmo sob condições desfavoráveis e ambientes agressivos.

Macroscopicamente, uma superfície metálica pode parecer limpa e polida; entretanto, a mesma é constituída por uma série de micro-camadas superficiais, conforme representado esquematicamente na Figura 2.1 (DE MELLO, 1994). A formação dessas micro-camadas superficiais é função tanto do processo de fabricação adotado para a obtenção do componente quanto dos fatores externos atuantes, como temperatura e umidade.

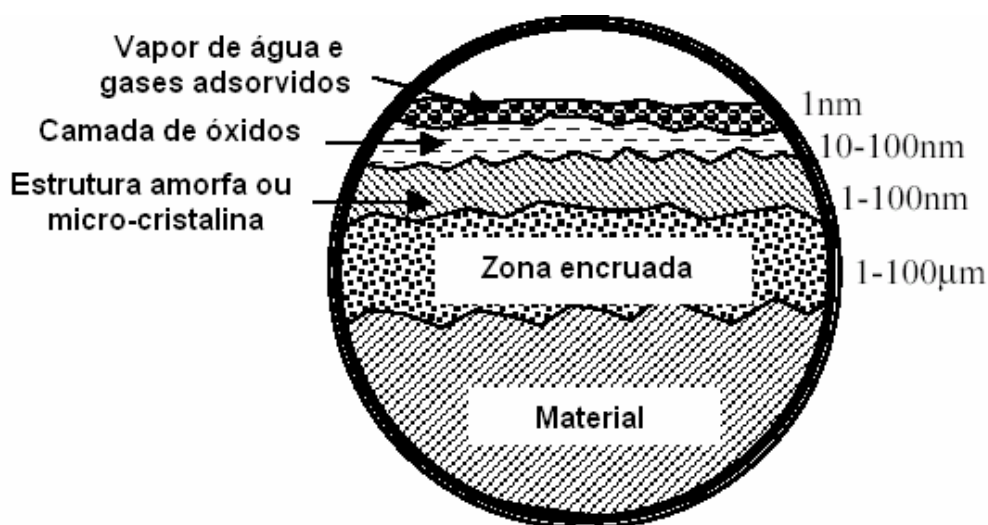


Figura 2.1 – Representação esquemática das micro-camadas de uma superfície metálica (DE MELLO, 1994).

A camada limite de uma superfície é caracterizada por uma região influenciada pelo meio em que se encontra e pelos processos a que ela foi submetida em sua obtenção. Vapores d'água e gases da atmosfera são adsorvidos por uma superfície metálica até uma profundidade de 1 nm [DE MELLO, 1994]. Óxidos formados naturalmente atingem espessuras de até 100

nm. No caso de uma superfície obtida por eletro-erosão, a resolidificação muito rápida de parte do material fundido pela descarga pode formar uma estrutura amorfa ou micro-cristalina com até 100 nm de espessura. A deformação plástica e o encruamento de processos mecânicos, como o torneamento e o fresamento, podem ser verificados até profundidades de 100 μm ou mais.

A forma geométrica e a topografia de uma superfície são funções diretas do processo de fabricação (fundição, injeção, corte ou conformação) utilizado para sua obtenção. Uma análise microscópica revela irregularidades e asperezas, conforme ilustra a Figura 2.2 (STROKES, 2003).

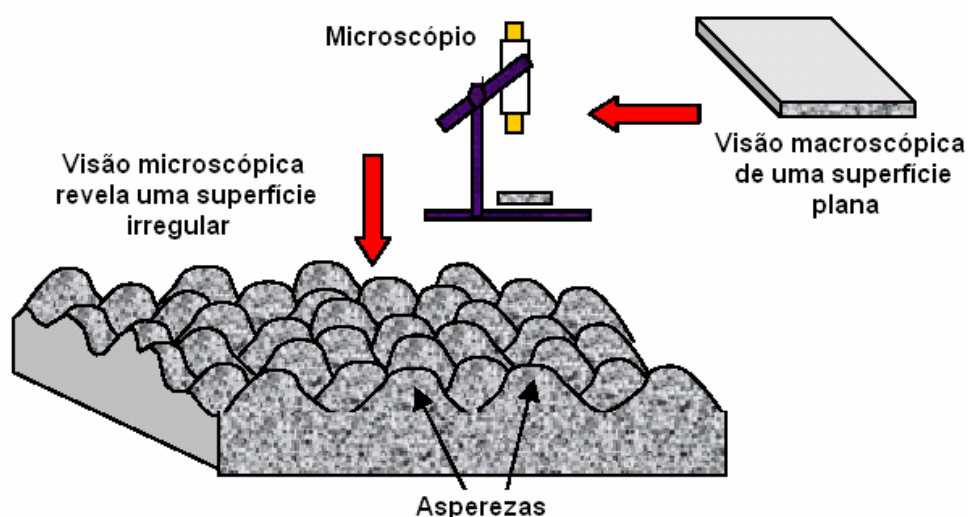


Figura 2.2 – Representação esquemática tridimensional das irregularidades microscópicas de uma superfície (STROKES, 2003).

A textura de uma superfície é caracterizada pelo seu perfil, definido como o resultado da combinação de três diferentes erros: rugosidade, ondulação e erro de forma. O perfil de uma superfície é apresentado esquematicamente na Figura 2.3 (STROKES, 2003).

Verifica-se que quando as superfícies de dois corpos estão em contato, esse, inicialmente, ocorre apenas entre os picos das irregularidades. Portanto, a área de contato real entre duas superfícies, composta pelo somatório dos contatos entre os picos dos diferentes

perfis dessas superfícies, constitui-se apenas em uma fração da área de contato aparente (BOWDEN; TABOR, 1950 *apud* SERBINO, 2005).

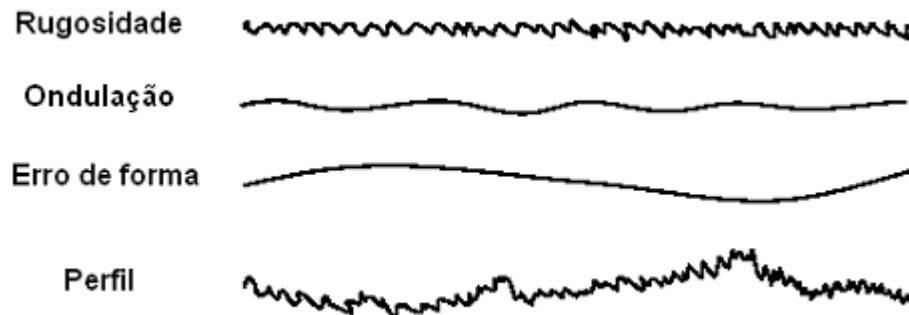


Figura 2.3 – Representação esquemática da formação do perfil superficial (STROKES, 2003).

As análises realizadas nesta seção servirão como base para o entendimento dos mecanismos de atrito e desgaste, discutidos nas seções seguintes deste capítulo.

2.2 Atrito

O atrito é definido como a resistência que um corpo desenvolve quando existe movimento relativo de um outro corpo, podendo ser entre sólidos (atrito sólido), gás e sólido (atrito aerodinâmico), líquido e sólido (atrito hidrodinâmico) ou devido a um processo de dissipação de energia interna (atrito interno) (SERBINO, 2005).

A magnitude da força de atrito é descrita em termos de um coeficiente de atrito, μ , que consiste na razão entre a força tangencial necessária para iniciar ou manter um movimento relativo, F_T , e a força normal, F_N , que pressiona os corpos entre si. Essa relação é denominada de primeira lei do atrito.

$$F_T \propto F_N \quad \text{ou} \quad F_T = \mu F_N \quad (2.1)$$

Os primeiros estudos que contribuíram para o entendimento da força de atrito foram realizados por Leonardo da Vinci (1452 – 1519) e Guillaume Amontons (1663 – 1705) (SERBINO, 2005). Eles encontraram valores constantes para o coeficiente de atrito, respectivamente $1/3$ e $1/4$, independentemente do par de materiais em contato (ZUM GAHR, 1987). Atualmente, sabe-se que o coeficiente de atrito é uma variável do sistema dependente de parâmetros operacionais (umidade, temperatura, velocidade e pressão de contato), de lubrificantes, de propriedades do substrato e dos revestimentos aplicados sobre as superfícies.

Os valores tabelados para o coeficiente de atrito, pelo fato do atrito não ser uma propriedade intrínseca do material e nem de uma combinação de materiais, pode trazer problemas complexos na utilização destes em projetos. Esses valores são, na grande maioria das vezes, obtidos para determinadas combinações de materiais e em condições laboratoriais específicas, empregando geometrias mais simples. Os valores tabelados fornecem orientações importantes, mas uma análise mais cuidadosa deve ser realizada nos casos mais críticos (LUDEMA, 1996 *apud* MARU, 2003).

A segunda lei do atrito mostra que a força de atrito, F_T , é independente da área de contato aparente entre os corpos. A área real de contato é percentualmente muito pequena em relação à área aparente de contato, conforme apresentado na seção anterior deste capítulo. Com o aumento da força normal, F_N , o número de asperezas em contato aumenta e a área média de contato de cada aspereza também aumenta, promovendo, conseqüentemente, o aumento da força de atrito. Desta forma se mostra que a força de atrito, F_T , depende da área real de contato entre os corpos e não da área aparente.

Charles Augustin Coulomb (1736 – 1806) estabeleceu uma terceira lei do atrito, mostrando que o atrito é independente da velocidade de deslizamento (BHUSHAN; GUPTA, 1991). Segundo Coulomb, a força necessária para iniciar o deslizamento de um corpo seria igual à força necessária para manter este mesmo corpo em deslizamento, em qualquer

velocidade, o que geralmente não condiz com a realidade. Experimentalmente, as duas primeiras leis do atrito são obedecidas dentro de uma determinada faixa de condições; porém, existe um grande número de exceções.

O atrito pode ser classificado em função do movimento relativo em: atrito de escorregamento e de rolamento.

O atrito de escorregamento ocorre devido à combinação dos efeitos da adesão entre superfícies planas, do sulcamento causado por fragmentos de desgaste e da deformação de asperezas (BHUSHAN; GUPTA, 1991). A contribuição da combinação destes efeitos depende do material, da topografia da superfície e das condições da interface de escorregamento. Segundo Bowden; Tabor (1942 *apud* DAL COMUNI; FAGUNDES, 2004), a força de atrito de escorregamento pode ser dividida em duas componentes, uma devido à adesão entre as áreas de contato das superfícies e outra devido à deformação plástica.

Um sistema de rolamento é constituído de dois corpos com raios de curvatura distintos que permitam que um corpo role sobre o outro. A área de contato ideal entre os corpos é uma linha (corpos cilíndrico) ou um ponto (corpo esférico). Devido às deformações elásticas (e plásticas) a área de contato real aumenta e os fenômenos que regem o atrito se tornam complexos devido à sua dependência de uma série de fatores, incluindo o escorregamento inconsistente durante o rolamento e as perdas de energia devido às deformações elásticas e plásticas. Se um torque é introduzido no sistema causando um movimento de rolamento, em adição as tensões de contato hertzianas, tangenciais ocorrem. A área de contato pode ser dividida em uma região de micro-escorregamento e uma região de adesão, dentro da qual as superfícies rolam sem movimento (escorregamento) relativo.

Apesar da quantidade considerável de pesquisas e estudos publicados sobre o atrito, desde as investigações iniciais de da Vinci, Amontons, Coulomb e Euler (BOWDEN; TABOR, 1950 *apud* BHUSHAN; GUPTA, 1991), não existe um modelo matemático que

possibilite a previsão ou o cálculo do coeficiente de atrito para um determinado par de materiais. Os estudos realizados até hoje contribuíram para o entendimento de que a origem do atrito está associada a interações mecânicas complexas entre os corpos em contato e que estas interações diferenciam-se de uma aplicação para outra.

Ludema (1988) menciona que o atrito ocorre devido à adesão limitada por efeitos de adsorção, e, em alguns casos, para determinadas superfícies rugosas, devido também à colisão de asperezas. Para superfícies lubrificadas, a adesão não é comumente discutida como uma causa do atrito, porém, a molhabilidade, a tensão de superfície e a viscosidade são manifestações de forças de ligação, em parte relacionadas com o mecanismo de adesão.

Segundo Dowson (1997), a aplicação de conceitos de ciência das superfícies e de técnicas em escala molecular ou atômica tem aprimorado o estudo do atrito por possibilitarem investigações relacionadas a contatos simples entre asperezas, em escala nanométrica. Essas investigações mostram que a força de atrito não é proporcional à força normal, devido às influências da força de adesão.

2.3 Desgaste

Segundo a norma DIN 50320 (1979), o desgaste é definido como sendo a perda progressiva de material de um corpo sólido devido à ação mecânica, ou seja, devido ao contato e ao movimento relativo de um corpo sólido contra outro corpo sólido, líquido ou gasoso. Consiste em um somatório de fenômenos complexos, ocorrendo principalmente devido ao escorregamento e impacto de partículas duras contra a superfície, mesmo na presença de lubrificantes (BRESSAN; HESSE; SILVA JR., 2001).

Existem diversas razões para se estudar o desgaste, dentre as quais destacam-se:

- a) Conhecer o comportamento ao desgaste de uma determinada classe de materiais;

- b) Otimizar ou selecionar materiais para uma determinada aplicação;
- c) Entender os efeitos de certas variáveis em um tipo particular de processo de desgaste;
- d) Dar suporte ao desenvolvimento de modelos preditivos e descritivos para o desgaste de um determinado tribosistema.

A complexidade dos mecanismos de desgaste pode ser evidenciada pela grande variedade de parâmetros, a maioria difíceis de serem controlados, que afetam a sua progressão. A Figura 2.4 (DE MELLO, 1994) apresenta alguns desses parâmetros.

O desgaste não é uma propriedade intrínseca dos materiais, mas sim uma característica dos tribosistemas, sendo caracterizado pela deterioração de componentes e estruturas devido à perda de material, danos por fadiga e aumento da rugosidade (ZUM GAHR, 1987).

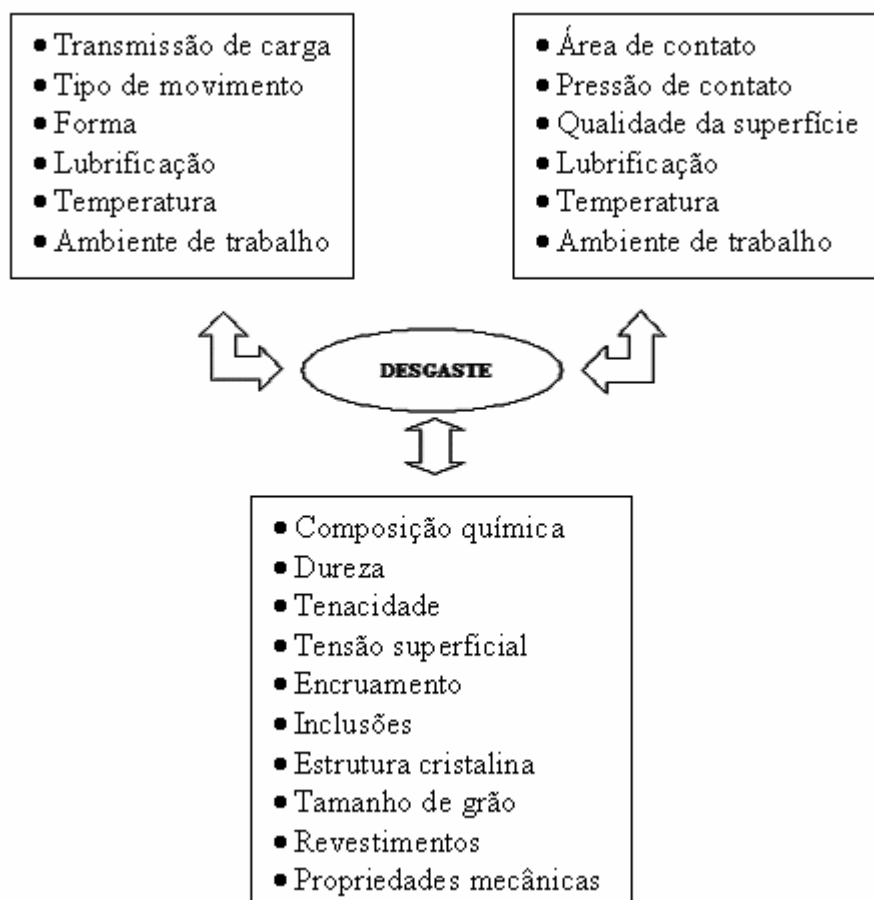


Figura 2.4 – Parâmetros tribológicos que afetam o desgaste (DE MELLO, 1994).

A falha por desgaste ocorre na medida em que o dano causado se torna tão grande que passa a interferir no funcionamento adequado do componente ou estrutura (ZUM GAHR, 1987).

O desgaste pode afetar a funcionalidade de um componente da seguinte maneira:

- Deterioração do próprio componente, como o desgaste de uma pastilha de freio;
- Perda volumétrica, ocasionando a alteração das tolerâncias e mudanças dimensionais;
- Perda da topografia;
- Surgimento de fragmentos de desgaste, ocasionando possíveis contaminações.

O desgaste raramente é catastrófico, mas reduz drasticamente a eficiência operacional, resultando em mudanças dimensionais ou danos às superfícies de atrito que podem causar problemas secundários, como aquecimento, ruído, vibração e desalinhamento.

O desgaste de um componente geralmente exhibe uma combinação de diferentes mecanismos de desgaste (REIS; ZAVAGLIA, 1999). Esses mecanismos interagem entre si promovendo o aumento na taxa de desgaste e conseqüentemente no dano total causado ao componente. Com propósitos de sua caracterização, esses mecanismos serão isolados e descritos individualmente nas próximas seções deste capítulo.

2.4 Tribologia

Tribologia é definida como a ciência e tecnologia de superfícies que interagem entre si em movimento relativo, sendo responsável pelas investigações e estudos de atrito, lubrificação e desgaste. O termo “tribologia”, derivado da palavra grega *tribos*, que significa desgaste, foi introduzido na década de 1960, pelo Comitê de Lubrificação presidido por Jost (1966).

A importância econômica da tribologia e a necessidade por pesquisas sistemáticas que promovam o aumento na transferência do conhecimento teórico para o campo industrial têm sido reconhecidas durante as três últimas décadas (ZUM GAHR, 1987). Estudos desenvolvidos em diferentes países industrializados, como o *Jost Report* (JOST, 1966) na Inglaterra, o *Tribology Reports* (BMFT-Report, 1976 *apud* ZUM GAHR, 1987) na Alemanha, o *ASME Report* (1977) nos Estados Unidos e o estudo de Jost e Schofield (1981) mostraram que as perdas econômicas devido ao atrito e desgaste somam, respectivamente, 1,0%, 2,5% e 2,0% do Produto Interno Bruto (PIB) destas nações. Um estudo mais recente realizado na Alemanha estima que as perdas anuais relacionadas ao atrito, desgaste e corrosão são da ordem de 4,5% do PIB (ZUM GAHR, 1987).

O *Jost Report* (JOST, 1966) estimou ainda que, anualmente, com a correta formação de engenheiros e projetistas com o objetivo de um melhor entendimento dos problemas tribológicos, US\$ 400 milhões poderiam ser economizados na Inglaterra (valor esse equivalente a 4% do PIB). Economias similares são sugeridas para outras nações industrializadas como Índia, China e Estados Unidos.

Peterson (1980) estimou que os custos dos problemas relacionados ao desgaste nos Estados Unidos totalizam anualmente US\$ 100 bilhões.

2.5 Tribosistema

Segundo Sinatora (1997), quando duas superfícies de um tribosistema estão em movimento relativo, a magnitude do desgaste será função das cargas aplicadas, das geometrias das partes em contato, da natureza dos corpos, do meio ambiente e da possível existência de um terceiro corpo entre as superfícies.

A Figura 2.5 (ZUM GAHR, 1987) mostra, de forma esquemática, um tribosistema de acordo com as especificações da norma DIN 50320 (1979).

Um sistema tribológico é constituído basicamente por quatro elementos (ZUM GAHR, 1987):

- a) Corpo sólido
- b) Contra-peça
- c) Elemento interfacial
- d) Ambiente

A contra-peça pode ser um sólido, um líquido, um gás ou uma mistura destes. Lubrificantes, camadas adsorvidas, poeira ou sólidos em geral, um líquido, um gás ou uma combinação destes atuam como elementos interfaciais. Em casos especiais, o elemento interfacial pode estar ausente do tribosistema.

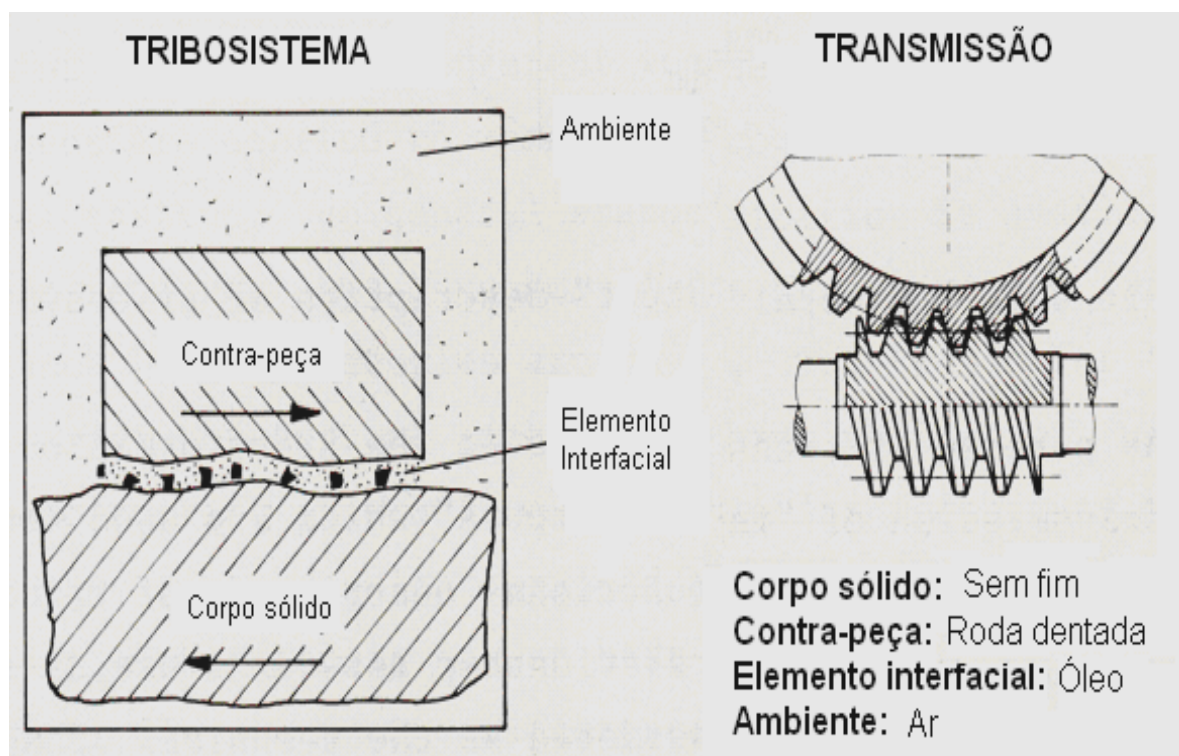


Figura 2.5 – Representação esquemática dos elementos de um tribosistema (ZUM GAHR, 1987).

2.6 Processos de Desgaste

A ação sobre os elementos de um tribosistema ou a interação entre eles pode variar amplamente, permitindo diversas classificações para os processos de desgaste.

A Figura 2.6 (ZUM GAHR, 1987) mostra uma representação esquemática da classificação dos processos de desgaste de acordo com o tipo de movimento entre as superfícies. O movimento entre as superfícies pode ser diferenciado em escorregamento, rolamento, oscilação, impacto e escoamento. Em função desta variação na cinemática do sistema, os processos de desgaste são classificados em deslizamento, rolamento, por oscilação, por impacto e erosivo. Estes podem ainda ser subdivididos em outras classificações, de acordo com algumas particularidades existentes nos elementos do tribosistema. O desgaste erosivo, por exemplo, pode ser diferenciado de acordo com o estado físico da contra-peça ou pelo ângulo de ação das partículas erosivas, conforme ilustrado na Figura 2.6.

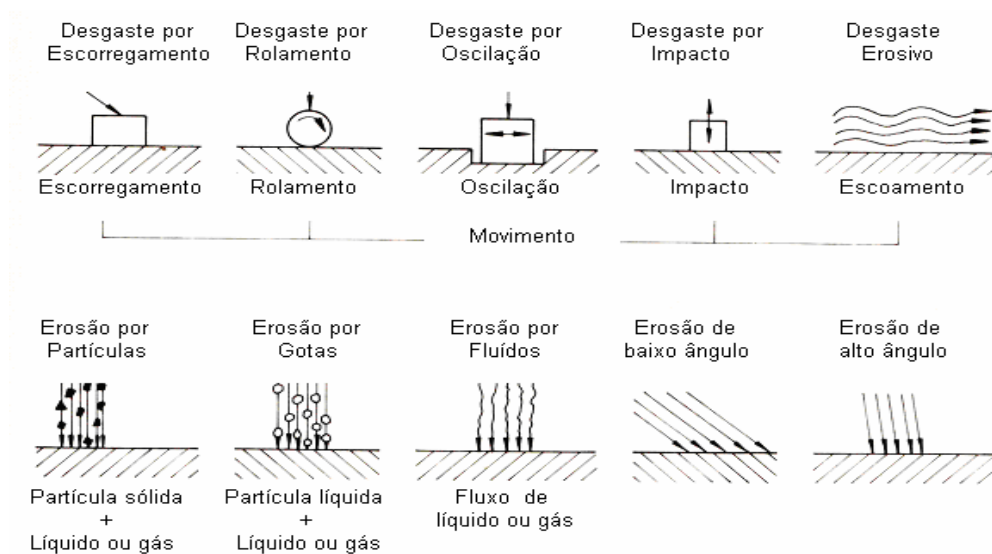


Figura 2.6 – Classificação dos processos de desgaste de acordo com o tipo de movimento entre as superfícies (ZUM GAHR, 1987).

Com relação ao elemento interfacial, os processos de desgaste podem ser diferenciados entre lubrificados e não lubrificados. Dependendo da estrutura de um tribosistema, as interações físicas e químicas que ocorrem entre os elementos podem resultar em remoção de material da superfície da contra-peça ou da superfície do corpo sólido.

A morfologia dos danos causados nas superfícies mostra o resultado do tribocontato, aplicado em várias etapas consecutivas e por diferentes micro-mecanismos em regime acumulativo. O volume do desgaste de uma peça é, geralmente, o resultado da combinação de vários mecanismos de desgaste, numa interação bastante complexa. A Tabela 2.1 (SERBINO, 2005) apresenta uma classificação dos processos de desgaste em função do dano causado.

Tabela 2.1 – Classificação dos processos de desgaste em função do dano causado (SERBINO, 2005).

Tipo de Dano	Resultado do Tribocontato
Sem troca de material	Causado pela alteração microestrutural, como envelhecimento, têmpera, recristalização, transformação de fases, entre outros.
	Caracterizado pela deformação plástica, extensa ou localizada, da camada limite.
	Trincas causadas por concentração de tensões, gradientes de temperatura cíclicos ou tensões induzidas mecanicamente.
Com troca de material	Perda de material na região da superfície de contato, gerando fragmentos de desgaste que são removidos através de fraturas por cisalhamento, extrusão, corte, fratura por fadiga, dissolução química e difusão.
Com ganho de material	Transferência de material proveniente da superfície oposta de contato ou depósito de partículas perdidas.
	Material proveniente da degradação da superfície pelas reações químicas com o ambiente ou pela superfície da contra-peça de contato.

Hokkirigawa *et al.* (1998 *apud* MARU, 2003) abordaram o contato plano-plano de um sistema deslizante real em termos geométricos, descrevendo as possíveis interações entre os corpos devido ao posicionamento das superfícies em contato. O contato real ocorre de forma localizada, em uma pequena região. A Figura 2.7 (HOKKIRIGAWA *et al.*, 1998 *apud*

MARU, 2003) mostra uma representação esquemática das possíveis interações mecânicas que podem ocorrer em um processo de deslizamento.

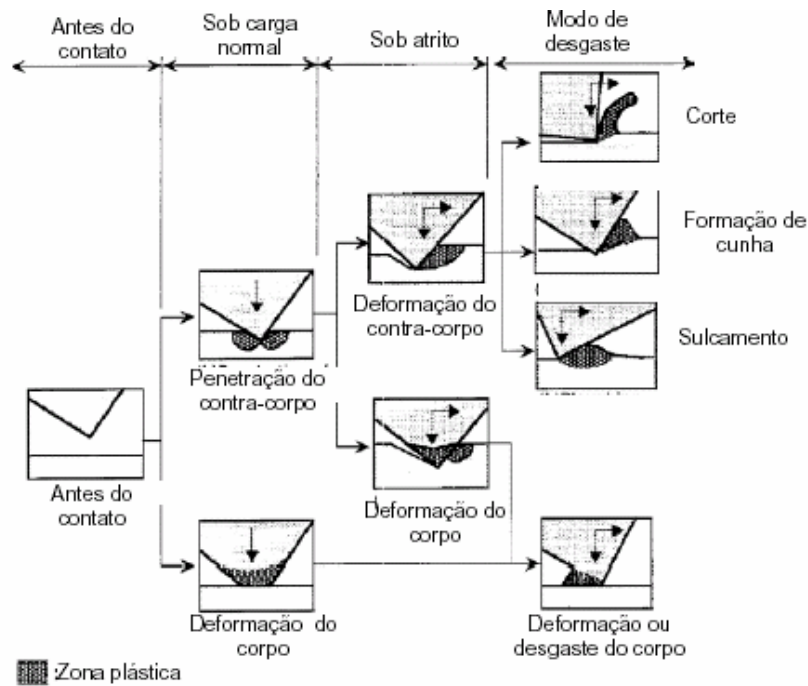


Figura 2.7 – Classificação dos processos de desgaste, em função das interações mecânicas entre os corpos, segundo Hokkirigawa *et al.* (1998 *apud* MARU, 2003).

2.7 Classificação dos Mecanismos de Desgaste

O entendimento dos mecanismos básicos atuantes no desgaste é fator primordial para o seu controle e sua prevenção. A natureza progressiva e acumulativa dos mecanismos de desgaste prejudica a avaliação das ações que levam os componentes às falhas (SCOTT, 1980).

A literatura mostra que duas linhas dividem as pesquisas com relação às falhas em componentes ocasionadas por desgaste. A primeira concentra as atenções nas análises de superfícies em movimento relativo e nas mudanças advindas desta interação, além dos efeitos de lubrificantes e do meio. A outra, tem como enfoque o isolamento dos mecanismos básicos

de desgaste, analisando as interações energéticas entre os elementos de um tribosistema (SCOTT, 1980).

O grande número de termos usado para descrever os mecanismos de desgaste dificulta a discussão dos problemas tribológicos. Os termos relacionados às características das superfícies desgastadas e dos mecanismos de desgaste muitas vezes são confundidos.

Algumas classificações dos mecanismos de desgaste são listadas na Tabela 2.2 (ZUM GAHR, 1987). A característica comum entre estas classificações é o uso de mecanismos básicos para diferenciar os processos de desgaste, permitindo, em alguns casos, a redução no número das classes. Do ponto de vista do mecanismo básico, uma distinção entre fadiga de superfície, desgaste por impacto e delaminação parece ser arbitrária, enquanto que a adesão baixa e severa diferenciam-se apenas pela severidade do desgaste, possuindo o mesmo mecanismo atuante, a adesão (ZUM GAHR, 1987).

Tabela 2.2 – Classificações dos mecanismos de desgaste (ZUM GAHR, 1987).

Fonte	Referência	Mecanismos de Desgaste
Burwell e Strang	(BURWELL; STRANG, 1952 <i>apud</i> ZUM GAHR, 1987)	Desgaste abrasivo, desgaste corrosivo, desgaste por fadiga, erosão, fricção e cavitação.
Jahanmir	(JAHANMIR, 1980 <i>apud</i> ZUM GAHR, 1987)	Adesão, delaminação, fricção, abrasão, erosão, desgaste por impacto, fadiga, desgaste por corrosão, desgaste difusivo e desgaste por contato elétrico.
Godfrey	(GODFREY, 1980 <i>apud</i> ZUM GAHR, 1987)	Desgaste adesivo baixo, desgaste adesivo severo, abrasão, erosão, corrosão, delaminação, eletrocorrosão, fricção corrosiva, falha por cavitação, descarga elétrica e polimento.
Rice	(RICE, 1980 <i>apud</i> ZUM GAHR, 1987)	Adesão, abrasão, fadiga, corrosão ou oxidação.
Bhushan	(BHUSHAN; GUPTA, 1991)	Adesão, abrasão, fadiga, erosão, corrosão e desgaste por arco elétrico induzido.
DIN 50320	(DIN 50320, 1979)	Adesão, abrasão, fadiga e reação triboquímica.

Com a redução de alguns termos apresentados na Tabela 2.2, que são redundantes, quatro mecanismos de desgaste merecem destaque:

- **Adesão:** formação de pontos adesivos na interface das superfícies em contato como, por exemplo, uma junção por solda a frio.

- **Abrasão:** remoção de material devido ao arrancamento de partículas.
- **Fadiga de superfície:** fadiga e formação de trincas na camada limite devido às tensões trativas cíclicas, resultando na separação do material.
- **Reação triboquímica:** formação de produtos como resultado de reações químicas entre os elementos de um tribosistema, inicializadas pela ação tribológica.

A Figura 2.8 (BRANKOVIC, 1998) mostra uma representação esquemática dos mecanismos descritos anteriormente. Segundo a norma DIN 50320 (1979), estes quatro mecanismos básicos, ou qualquer combinação dos mesmos, estão envolvidos no processo de desgaste.

A grande maioria dos sistemas tribológicos está submetida à ação simultânea de vários mecanismos de desgaste. Entretanto, apesar desta ação simultânea, existe sempre um mecanismo predominante que determina a taxa de remoção de material. A aparência da superfície desgastada de um tribosistema pode indicar o principal mecanismo atuante.

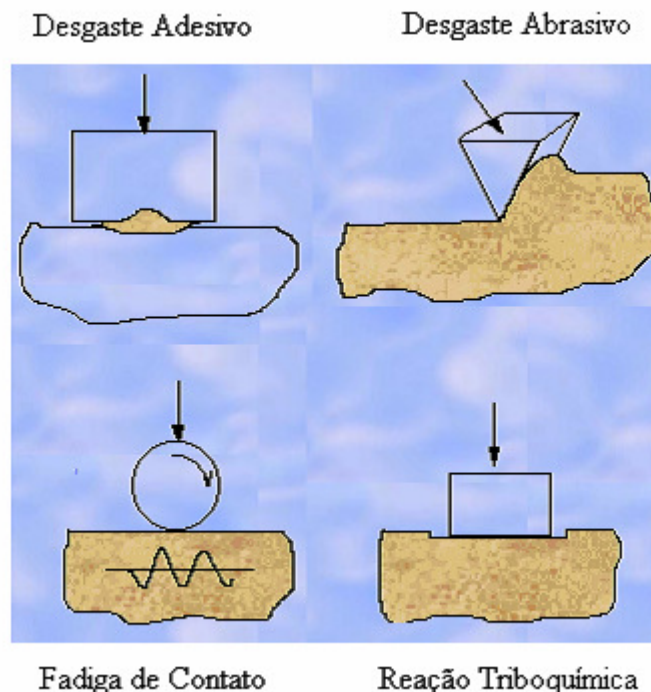


Figura 2.8 – Mecanismos de desgaste conforme DIN 50320 (BRANKOVIC, 1998).

As interações entre mecanismos de desgaste dependem do sistema tribológico, mais do que propriamente das características do material, tornando complexa a sistematização do

seu estudo. Além disso, observa-se que existe uma dificuldade na previsão da ocorrência das interações entre mecanismos de desgaste ao se englobar as diferentes variáveis capazes de promover modificações, tanto topográficas quanto físico-químicas, nas superfícies de contato dos materiais. Pode-se citar como variáveis mais importantes a dureza relativa dos materiais, a temperatura, a carga e a velocidade, bem como as variáveis microestruturais, como a natureza e a distribuição das fases e a fração volumétrica do filme de óxido sobre as superfícies em contato (MATAMOROS, 2004).

Nas seções seguintes, serão apresentadas as características dos mecanismos básicos de desgaste por abrasão e por adesão, principais mecanismos verificados nos processos de conformação mecânica a frio. Uma descrição mais detalhada dos demais mecanismos básicos de desgaste, não abordados neste trabalho, pode ser encontrada no trabalho de Suski (2004).

2.7.1 Abrasão

Dos mecanismos de desgaste apresentados, a abrasão é o mais importante, por promover uma grande perda de material e por ser o mecanismo mais atuante nos processos de conformação. Este mecanismo é responsável por 50% dos casos de falha por desgaste, seguido pela adesão, com 15% (DE MELLO, 1994). A Figura 2.9 (DESGASTE, 2005) mostra um componente que sofreu desgaste abrasivo.

O desgaste abrasivo consiste no deslocamento e perda de material causado pela presença de partículas duras entre duas superfícies em movimento relativo. Estas partículas duras podem estar livres ou engastadas em uma ou nas duas superfícies, sendo que sua origem está geralmente associada a uma das situações abaixo:

- Entrada de impurezas oriundas do meio no qual o tribosistema está inserido;
- Produtos de algum processo químico, como a oxidação;
- Fragmentos de desgaste de materiais de dureza elevada;

- Partículas duras presentes nos materiais, como carbonetos.

Além disso, protuberâncias, tais como asperezas em superfícies usinadas, podem agir como partículas duras caso esta superfície seja muito mais dura do que a contra-peça (ZUM GAHR, 1987).

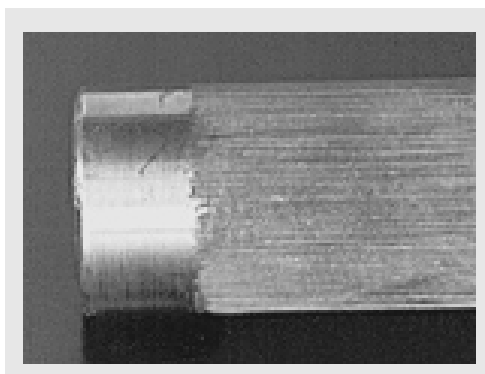


Figura 2.9 – Aspecto superficial de um componente que sofreu desgaste abrasivo (DESGASTE, 2005).

Estimativas indicam que a abrasão é responsável por perdas econômicas importantes. Estatísticas mostram que de 1 a 5% do PIB das nações desenvolvidas é gasto, direta ou indiretamente, pela ação do desgaste abrasivo (DE MELLO, 1994).

A Figura 2.10 (BRANKOVIC, 1998) mostra exemplos de tribosistemas onde a abrasão é o mecanismo de desgaste predominante. Sistemas de escorregamento, sistemas hidráulicos, extrusões, corte de rochas, matrizes para metalurgia do pó e conformação mecânica nos quais a superfície da contra-peça exibe protuberâncias ou partículas de alta dureza resultando em desgaste abrasivo.

As características dos materiais submetidos à ação do desgaste abrasivo possuem um efeito significativo sobre a magnitude do dano causado (EKBERG, 1997). A influência de algumas dessas características é apresentada na Tabela 2.3 (EKBERG, 1997).

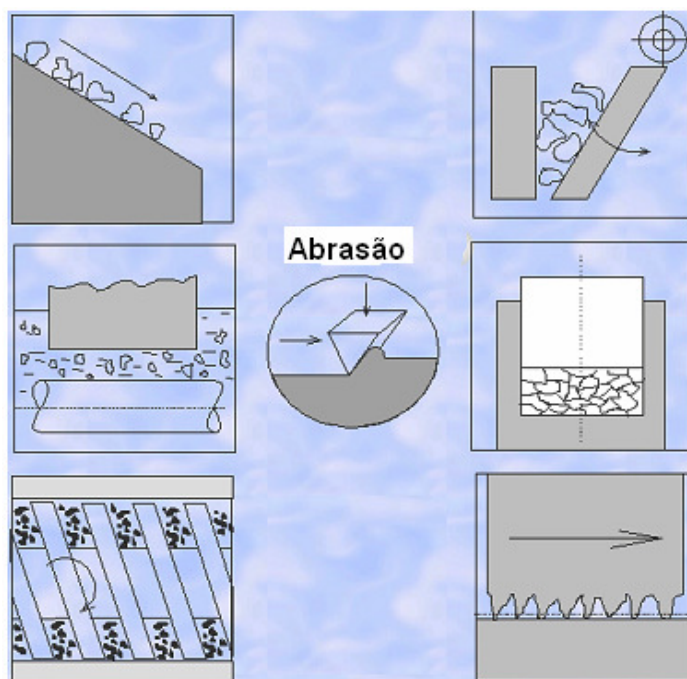


Figura 2.10 – Exemplos de tribosistemas submetidos ao mecanismo de desgaste abrasivo (BRANKOVIC, 1998).

Tabela 2.3 – Influência das características dos materiais no desgaste abrasivo (EKBERG, 1997).

Característica do Material	Efeito sobre o Desgaste Abrasivo
Dureza	Relação linear entre a dureza da superfície desgastada e a resistência ao desgaste. Materiais puros e ligas possuem diferentes graus de correlação.
Módulo de elasticidade	Existem dúvidas na correlação entre a resistência ao desgaste e o módulo de elasticidade. Um alto módulo de elasticidade proporcionaria altas tensões de contato que, por sua vez, promoveria a redução na resistência ao desgaste. Entretanto, como o módulo de elasticidade está conectado a muitas outras propriedades do material, esta correlação ainda é difícil.
Estrutura cristalina	Os cristais cúbicos desgastam-se a taxas duas vezes maior que os cristais hexagonais.
Microestrutura	Quanto maior for a ductilidade e o encruamento do material, maior será a resistência ao desgaste. A introdução de uma segunda fase é um método utilizado para aumentar a resistência ao desgaste.
Tenacidade à fratura	Quanto maior a tenacidade, maior é a resistência ao desgaste, principalmente em materiais frágeis.
Temperatura de fusão	Quanto maior a temperatura de fusão, maior é a resistência ao desgaste, devido a menor tendência ao amolecimento.
Composição química	A adição de elementos de liga é comumente utilizada para aumentar a resistência ao desgaste.

Além disso, as características de outros elementos do tribosistema, tais como o elemento interfacial (abrasivo) e o ambiente no qual o mesmo está inserido, também

influenciam a abrasão de maneira considerável. A Tabela 2.4 (EKBERG, 1997) apresenta um resumo do efeito destes outros elementos.

Tabela 2.4 – Influência de outros elementos do tribosistema no desgaste abrasivo (EKBERG, 1997).

Elemento	Característica	Efeito sobre o Desgaste Abrasivo
Abrasivo	Ângulo de ataque crítico	Um abrasivo de perfil arredondado proporciona uma menor taxa de remoção de material.
	Dureza	Quando a dureza do abrasivo excede a dureza da superfície desgastada, o desgaste se torna muito pior.
	Tenacidade	Um abrasivo mais tenaz induz um desgaste maior.
	Tamanho	Para um dado volume, abrasivos maiores promovem um menor desgaste pelo fato de apresentarem uma menor quantidade de pontos de contato. Além disso, as tensões de contato nesses pontos também são menores.
Ambiente	Temperatura	O efeito da temperatura no desgaste é pequeno, pelo fato de que apenas pequenas áreas de contato são aquecidas durante o desgaste abrasivo. Alumínio e cobre são exceções para esta situação.
	Umidade	A influência da umidade ainda não está definitivamente esclarecida. A principal característica considerada é a sua influência na formação de camadas superficiais (principalmente da camada de óxidos).

De acordo com Wahl (1951 *apud* ZUM GAHR, 1987) e Wellinger; Uetz (1955 *apud* ZUM GAHR, 1987), o desgaste abrasivo ocorre em diferentes níveis de intensidade, dependendo da relação entre as durezas das partículas abrasivas e da superfície que está sendo desgastada. A Figura 2.11 (ZUM GAHR, 1987) ilustra, para materiais homogêneos e heterogêneos (que contêm carbonetos duros na matriz), a transição entre os níveis de intensidade de desgaste mencionados.

Nos materiais homogêneos, a mudança do nível mais baixo de desgaste ocorre quando a dureza do abrasivo é igual à do material desgastado, ou seja, a razão entre as durezas é igual a 1 (início da região inclinada, linha cheia). Nos materiais heterogêneos, devido a matriz ser mais dúctil do que a matriz dos materiais homogêneos para o mesmo nível de dureza, considera-se a transição do nível de intensidade de desgaste quando a dureza do abrasivo ultrapassa a do material (fase dura + matriz - início da região inclinada, linha traço ponto).

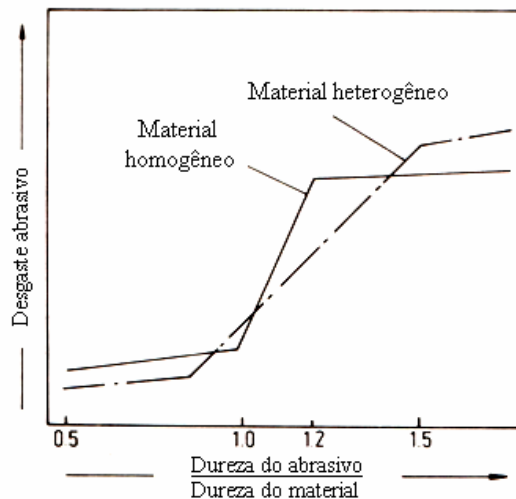


Figura 2.11 – Desgaste abrasivo como função da relação entre a dureza das partículas abrasivas e da dureza da superfície em desgaste (ZUM GAHR, 1987).

Segundo Avery (DE MELLO, 1994), o desgaste abrasivo pode ser classificado de acordo com a configuração mecânica atuante em:

- **Abrasão entre dois corpos:** as partículas abrasivas ou asperidades são animadas de movimento relativo em relação à superfície do material. Marcas e riscos são formados paralelamente à direção de deslocamento destas partículas, conforme ilustrado na Figura 2.12.A (BRANKOVIC, 1998).
- **Abrasão entre três corpos:** as partículas abrasivas agem como elementos interfaciais entre duas superfícies em movimento relativo. As partículas estão livres na interface, deformando plasticamente as superfícies de contato, conforme apresentado na Figura 2.12.B (BRANKOVIC, 1998).

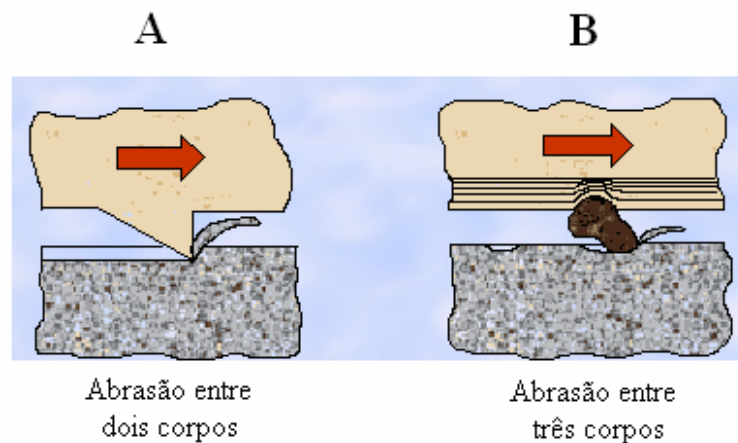


Figura 2.12 – A: Abrasão entre dois corpos; B: Abrasão entre três corpos (BRANKOVIC, 1998).

A magnitude do desgaste na abrasão entre três corpos é uma a duas vezes menor que na abrasão entre dois corpos (ZUM GAHR, 1987). Ekberg (1997) afirma que esta relação pode chegar a valores dez a cem vezes menor, para uma mesma condição de carga e distância percorrida, pelo fato de que na abrasão entre três corpos apenas uma pequena proporção das partículas abrasivas causa o desgaste, dadas as variações no ângulo de ataque.

O desgaste abrasivo pode ainda ser classificado de acordo com o micro-mecanismo de abrasão, conforme mostra a Figura 2.13 (ZUM GAHR, 1987), da seguinte forma:

- **Micro-sulcamento:** deformações plásticas sem perda de material, gerando um sulco com conseqüente formação de acúmulos frontais e laterais do material movimentado. Em algumas situações, este micro-mecanismo pode acarretar a perda de material, devido à ação simultânea ou sucessiva de muitas partículas abrasivas.
- **Micro-corte:** formação de micro-cavacos com pequena deformação plástica lateral.
- **Micro-lascamento:** formação de grandes partículas de abrasão devido à formação e interação de fissuras. Ocorre quando as tensões impostas superam as tensões críticas para a formação e propagação de trincas, sendo um mecanismo restrito a materiais frágeis. De acordo com Bowden; Tabor (1964), os materiais frágeis podem escoar plasticamente até que a zona de deformação exceda um determinado valor crítico, ocasionando a formação de trincas.

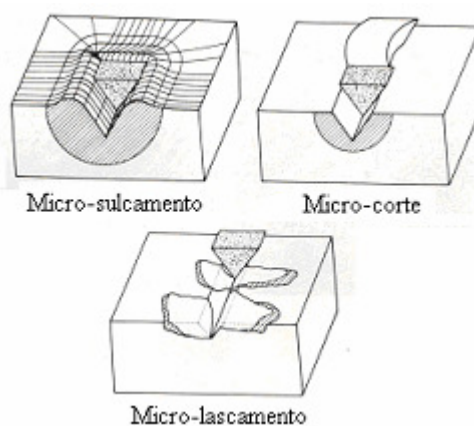


Figura 2.13 – Representação esquemática dos micro-mecanismos abrasivos (ZUM GAHR, 1987).

A Figura 2.14 (BRANKOVIC, 1998) apresenta micrografias dos micro-mecanismos abrasivos em superfícies de aços desgastadas.

Mulhearn, Samuels e Sedriks (DE MELLO, 1994) evidenciaram a existência de um ângulo de ataque crítico que controla a transição entre micro-sulcamento e micro-corte. Este ângulo de ataque crítico, designado por α_c , é definido como o ângulo entre a face ativa da partícula abrasiva e a superfície, sendo uma função do material desgastado e das condições de teste. A Figura 2.15 (ZUM GAHR, 1987) apresenta micrografias de ferro Armco para diferentes ângulos de ataque.

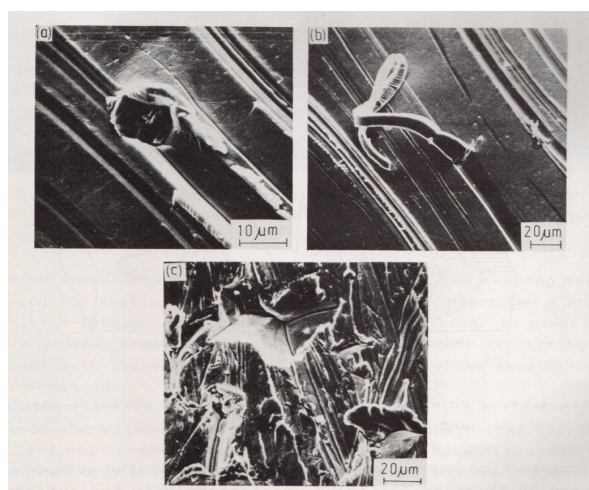


Figura 2.14 – Micrografias de interações entre partículas abrasivas minerais e superfícies de aço: (a)Micro-sulcamento, (b)Micro-corte e (c)Micro-lascamento (BRANKOVIC, 1998).

Teoricamente, α_c descreve uma transição brusca entre micro-sulcamento e micro-corte. Entretanto, na prática, uma transição gradual entre estes micro-mecanismos é observada com o aumento do ângulo de ataque, conforme mostra a Figura 2.16 (ZUM GAHR, 1987).

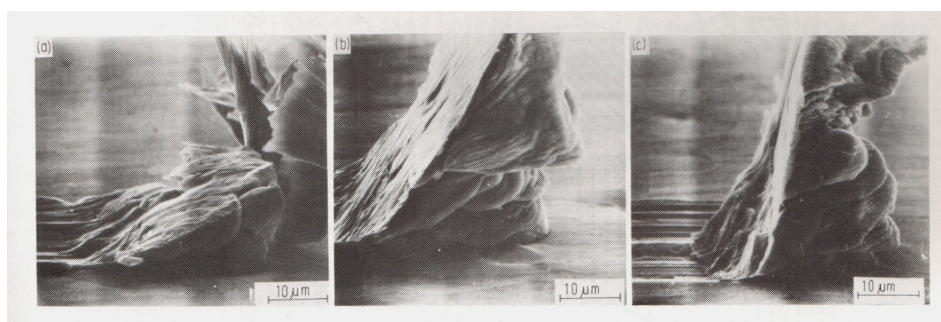


Figura 2.15 – Micrografias de ferro Armco com diferentes ângulos de ataque da partícula abrasiva: (a)30°; (b)60° e (c)90° (ZUM GAHR, 1987).

Além do ângulo de ataque, a transição entre micro-sulcamento e micro-corte depende das propriedades do material desgastado, como a dureza, e de outras condições de operação, como o coeficiente de atrito. O aumento na dureza do material desgastado promove a mudança no predomínio do micro-mecanismo atuante, passando de micro-sulcamento para micro-corte. Com um aumento ainda maior na dureza do material, ocorre a transição do micro-corte para o micro-lascamento, também conhecida como transição abrasão dúctil / frágil (ZUM GAHR, 1987).

O controle do ângulo de ataque nem sempre é de fácil realização industrial. Além disso, as deformações plásticas promovidas pelo impacto de partículas abrasivas com baixos ângulos de ataque podem levar ao endurecimento e conseqüente fragilização do material, implicando na mudança do mecanismo atuante e grande severidade do desgaste. Assim, o controle do desgaste passa necessariamente pela seleção do material (DE MELLO, 1994).

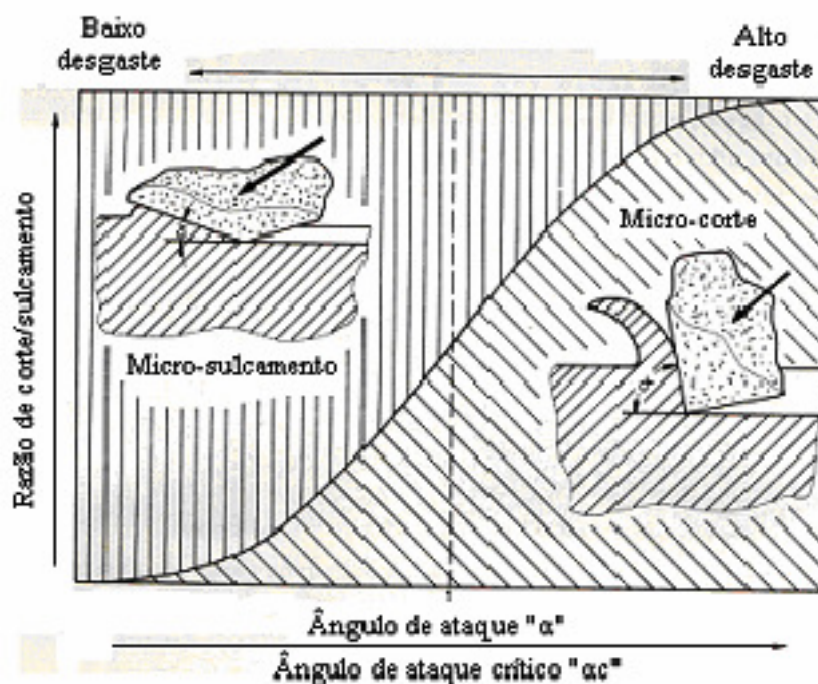


Figura 2.16 – Razão entre micro-corte e micro-sulcamento como função da razão entre o ângulo de ataque e o ângulo de ataque crítico (ZUM GAHR, 1987).

O desgaste abrasivo pode ter seu efeito reduzido pela adição de partículas duras na matriz do material desgastado (TOMANIK, 2000). Essas partículas podem interromper os riscos (micro-corte e micro-sulcamento), dependendo da distribuição e do tamanho relativo das mesmas em relação ao abrasivo. A Figura 2.17 (TOMANIK, 2000) mostra um exemplo dessa interrupção pela presença de carbonetos de nióbio na face de contato de um anel de ferro fundido nodular.

O desenvolvimento de materiais com maior resistência ao desgaste abrasivo é de extrema importância econômica. Entretanto, este compreende um problema complexo, tendo em vista a dificuldade na concepção de ensaios que tenham uma maior representatividade com as condições encontradas na indústria e que ao mesmo tempo permitam a realização de análises mais rigorosas.

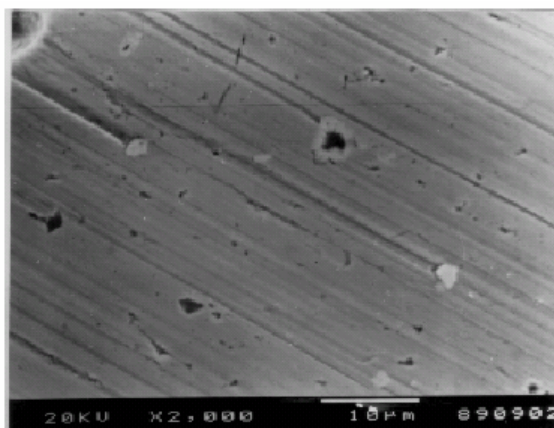


Figura 2.17 – Riscos de desgaste sendo interrompidos por carbonetos de nióbio na face de contato de um anel de ferro fundido nodular (TOMANIK, 2000).

2.7.2 Adesão

Independentemente do processo de fabricação, em escala microscópica, as superfícies sempre apresentam irregularidades, conforme representação esquemática mostrada na Figura 2.2. Desta forma, a área real de contato compreende apenas uma fração da área total

aparente, tendo em vista que o contato está limitado a somente alguns pontos, tornando as tensões desenvolvidas nestas regiões muito elevadas.

Os altos níveis de tensão entre as irregularidades em contato ultrapassam o limite de escoamento do material, resultando em deformação plástica, adesão e, conseqüentemente, na formação de junções locais. O escorregamento relativo entre as superfícies ocasiona a ruptura destas junções, possibilitando a transferência de material de uma superfície para a outra, caracterizando o desgaste adesivo. As Figuras 2.18 (DESGASTE, 2005) e 2.19 (CISER, 2005) ilustram dois componentes submetidos ao mecanismo de desgaste adesivo.

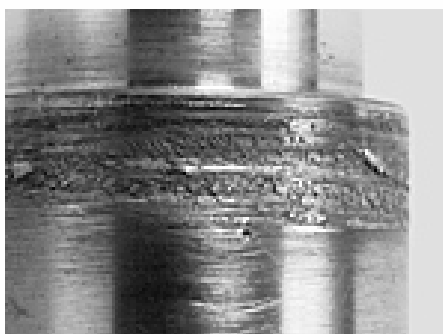


Figura 2.18 – Componente submetido ao mecanismo de desgaste adesivo (DESGASTE, 2005).

A tendência à formação de pontos de adesão depende das propriedades físicas e químicas dos materiais em contato, do modo e valor da força aplicada e das características das superfícies em contato, tais como contaminação e rugosidade (ZUM GAHR, 1987).



Figura 2.19 – Matriz de estampagem a frio de porcas sextavadas apresentando severo desgaste adesivo (CISER, 2005).

A Figura 2.20 (ZUM GAHR, 1987) mostra diferentes rupturas de superfícies unidas por adesão. Se a resistência da junção é menor que as resistências dos materiais A e B, a ruptura da adesão ocorre na interface formada entre estas superfícies. Esta situação, representada na Figura 2.20.1, freqüentemente ocorre em superfícies cobertas com óxidos, que reduzem a adesão superficial. Conforme a Figura 2.20.2, a separação ocorre apenas no material A se este possuir resistência mais baixa que a junção ou que o material B. Para uniões de alta resistência, a ruptura ocorre predominantemente no material A caso este possua resistência mais baixa que o material B (Figura 2.20.3). Porém, na união de materiais com resistências iguais ou muito similares, a separação pode ocorrer em partes iguais, de ambos os lados da interface, conforme mostra a Figura 2.20.4.

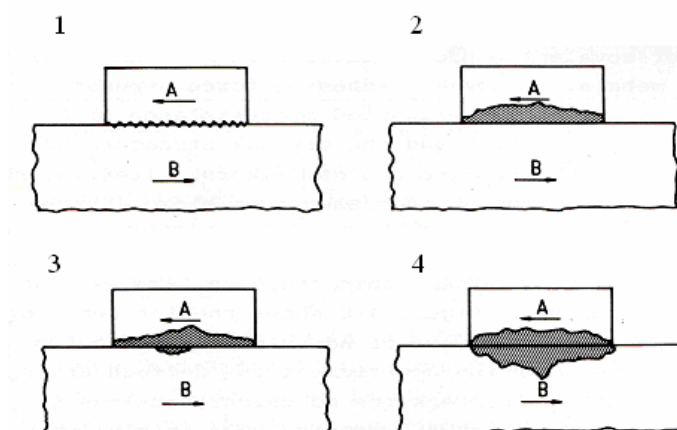


Figura 2.20 – Ruptura das junções por adesão: (1)Na interface; (2)No material A, de resistência mais baixa; (3)Predominantemente no material A, de resistência mais baixa, mas também no material B e (4)Em partes iguais, nos materiais A e B (ZUM GAHR, 1987).

A estrutura cristalina exerce uma influência considerável no mecanismo de adesão (BHUSHAN; GUPTA, 1991). Sikorski (1964) mostrou que a tendência à adesão, em função da estrutura cristalina, aumenta na seguinte ordem: estrutura hexagonal compacta (HC), estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) e estrutura cúbica de face centrada (CFC). Acredita-se que esta diferença ocorra em função dos diferentes modos de deformação e do número e densidade dos sistemas de escorregamento presentes nos cristais.

A Figura 2.21 (SIKORSKI, 1964) mostra a variação do coeficiente de adesão em função da estrutura cristalina e da dureza dos metais. O coeficiente de adesão é definido como a razão entre a força necessária para a ruptura da junção por adesão e a força normal de compressão a qual as superfícies estão submetidas. De forma geral, o aumento na dureza dos materiais resulta em decréscimo do coeficiente de adesão.

Muitas teorias sobre os mecanismos de desgaste por adesão são apresentadas e discutidas na literatura (ZUM GAHR, 1987). Kinloch (1980) propôs a divisão dos mecanismos de adesão em quatro grupos principais: adesão mecânica, por difusão, eletrônica e por adsorção. A Figura 2.22 (KINLOCH, 1980) mostra uma representação esquemática destes mecanismos.

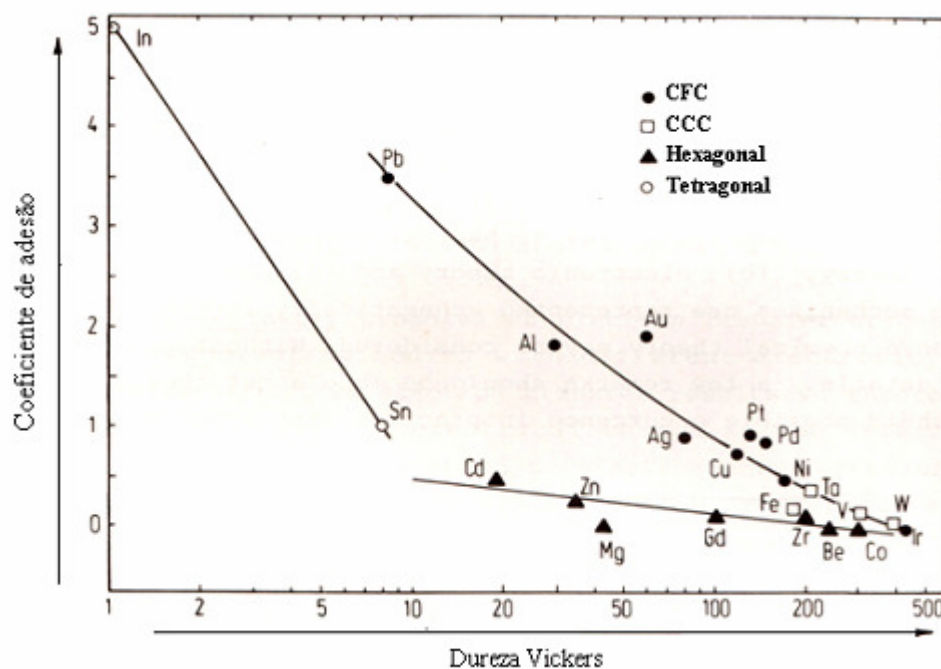


Figura 2.21 – Variação do coeficiente de adesão em função da dureza e estrutura cristalina dos metais (SIKORSKI, 1964).

O mecanismo de adesão mecânica atribui a adesão ao contato entre as irregularidades superficiais, evidenciando a influência da rugosidade na resistência da interface. Este tipo de mecanismo pode ser observado na adesão de polímeros em tecidos ou na penetração de polímeros no estado líquido em micro-fissuras de superfícies metálicas (ZUM GAHR, 1987).

A adesão por difusão ocorre quando átomos ou moléculas de dois corpos em contato se difundem através da interface. Para polímeros de cadeias longas, por exemplo, a adesão pode ser causada pela difusão mútua da cadeia de moléculas ou de seus segmentos através da interface. Para tanto, este mecanismo requer mobilidade suficiente dos segmentos da cadeia e solubilidade mútua dos polímeros, como evidenciado experimentalmente por Flom; Porile (1955 *apud* ZUM GAHR, 1987). Para os metais, existem contradições na literatura com relação ao requisito de solubilidade mútua. Goodzeit; Hunnicutt; Roach (1956 *apud* ZUM GAHR, 1987) concluíram que a força de adesão aumenta com a solubilidade mútua entre as superfícies metálicas em contato. Entretanto, Habig (1970 *apud* ZUM GAHR, 1987) mostrou que metais mutuamente insolúveis, quando em contato, também são passíveis de forte adesão.

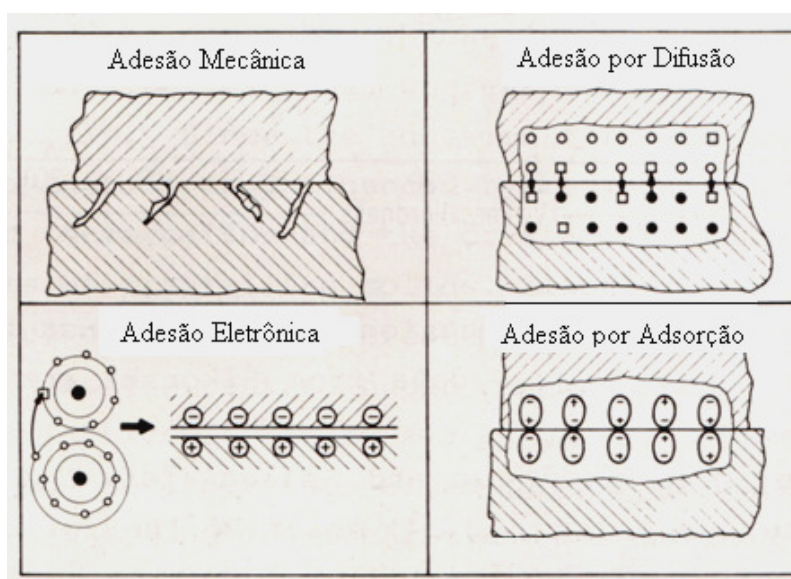


Figura 2.22 – Representação esquemática dos mecanismos de adesão, segundo Kinloch (1980).

O mecanismo de adesão eletrônica propõe a transferência de elétrons entre corpos em contato com diferentes bandas eletrônicas, resultando na formação de uma dupla camada de carga elétrica na interface. Esta dupla camada consiste no excesso ou deficiência de elétrons na superfície do corpo e na presença de íons com cargas de sinais opostos na interface. Presume-se que a adesão seja causada pela atuação de forças eletrostáticas efetivas

através desta dupla camada. A Figura 2.23 (ZUM GAHR, 1987) mostra uma representação esquemática da formação da dupla camada de cargas elétricas.

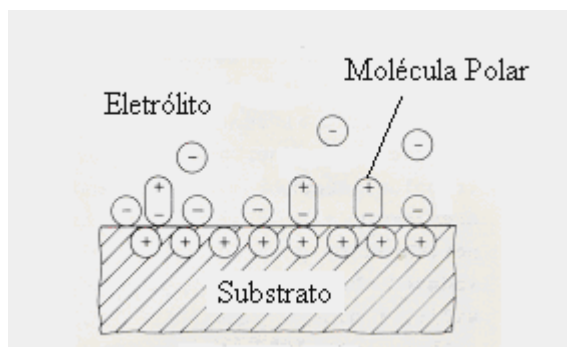


Figura 2.23 – Representação esquemática da formação da dupla camada de cargas elétricas na interface do substrato (ZUM GAHR, 1987).

O modelo de doação e recepção de átomos apresentado por Derjaguin e Smilga (ZUM GAHR, 1987) descreve a influência da estrutura eletrônica dos átomos nas superfícies de contato durante a adesão. Neste modelo, fortes adesões ocorrem caso os átomos de diferentes superfícies atuem como doadores e receptores de elétrons, conforme representado na Figura 2.24 (ZUM GAHR, 1987). O número e a camada eletrônica (s, p, e d) dos elétrons livres na interface de contato influenciam diretamente a adesão.

Os processos de transferência de elétrons ocorrem geralmente devido à ativação eletrônica da superfície pelo atrito durante o desgaste. Entretanto, o aumento na mobilidade dos elétrons superficiais pode ser obtido também por processos de emissão exoelétrica, ocasionados por deformação ou aquecimento. Vijh (1975 *apud* ZUM GAHR, 1987) calculou a energia de ligação entre diferentes metais utilizando a energia de sublimação e os números de coordenação. Os resultados mostraram uma redução no coeficiente de adesão com o aumento na energia de ligação. Uma relação satisfatória entre o coeficiente de adesão e a energia de ligação foi encontrada apenas para os metais com estrutura cúbica de corpo centrado, cúbica de face centrada e tetragonal, ao contrário da estrutura hexagonal.

A adesão por adsorção refere-se à adesão entre superfícies em contato intermolecular devido às ligações secundárias, como as forças de Van der Waals. As principais ligações que favorecem a adesão, para os diferentes grupos de materiais, são apresentadas na Tabela 2.5 (ZUM GAHR, 1987).

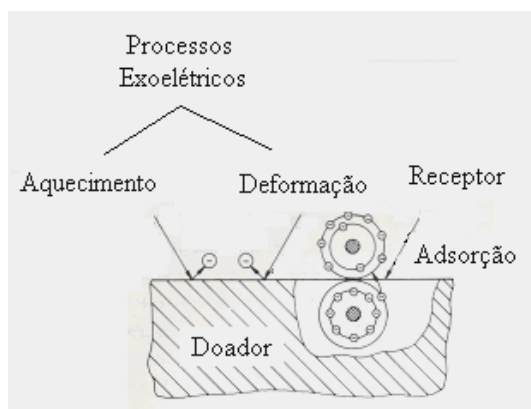


Figura 2.24 – Modelo de transferência de elétrons proposto por Derjaguin e Smilga (ZUM GAHR, 1987).

Tabela 2.5 – Diferentes grupos de materiais e suas principais ligações (ZUM GAHR, 1987).

Materiais	Ligações Principais
Metais	Ligações primárias metálicas e covalentes e ligações secundárias, como as forças de Van der Waals.
Polímeros	Forças de Van der Waals, ligações de hidrogênio e ligações eletrostáticas devido à dupla camada de cargas elétricas.
Cerâmicas	Ligações primárias, forças de Van der Waals e ligações eletrostáticas.

Alguns autores apresentam ainda uma quinta divisão para os mecanismos de adesão, conhecida como adesão química (ZUM GAHR, 1987). A adesão química é caracterizada pela ocorrência de adsorções químicas na interface de contato entre dois corpos. Apresenta as mesmas características do mecanismo de adesão por adsorção, porém com o estabelecimento de ligações primárias na interface de contato.

2.8 Ensaios de Desgaste

A avaliação do comportamento tribológico de diferentes materiais e lubrificantes é importante para a definição dos parâmetros de desgaste, e da influência de vários fatores sobre estes parâmetros, visando à garantia da performance e da confiabilidade dos componentes em serviço. A simulação de sistemas complexos através de modelos é particularmente importante para o estudo dos mecanismos básicos de atrito, lubrificação e desgaste atuantes (ZUM GAHR, 1987).

Os ensaios de desgaste são tradicionalmente utilizados para classificar os materiais de acordo com a resistência ao desgaste, possibilitando a otimização do processo de seleção ou de desenvolvimento dos mesmos para uma determinada aplicação. Boa repetibilidade, tempo de ensaio curto e facilidade na realização das medições são características desejadas nestes ensaios (BAYER, 1985).

A ação do mecanismo de desgaste predominante está relacionada às condições de atrito e de lubrificação. É possível, através de um mesmo ensaio de desgaste, avaliar as condições de atrito, de lubrificação e de desgaste; porém, como se tratam de fenômenos distintos, os procedimentos experimentais e as interpretações variam consideravelmente. Por exemplo, um ensaio de lubrificação avalia a habilidade do lubrificante de suportar elevadas temperaturas, velocidades ou carregamentos e promover proteção contra o desgaste; o grau ou a quantidade de desgaste é uma medida da resposta do lubrificante. Em um ensaio de desgaste, que pode ser conduzido com ou sem lubrificação, o interesse concentra-se na resposta do material ao desgaste, enquanto um ensaio de atrito avalia a força ou o coeficiente de atrito. Um ensaio de atrito pode também ser utilizado para avaliar o desempenho do lubrificante, enquanto os ensaios de desgaste podem ser utilizados para avaliação e monitoramento do atrito.

A Figura 2.25 (BAYER, 1985) mostra uma representação esquemática das configurações dos principais ensaios de desgaste. As dimensões dos corpos de prova variam entre 25 e 75 mm, na forma de pinos, blocos, anéis e discos. As faixas de carregamentos utilizadas variam de frações a milhares de quilos. Alguns destes aparatos permitem carregamentos fixos, enquanto outros são variáveis ou aumentam o carregamento automaticamente. As velocidades utilizadas situam-se entre uma ampla faixa de valores, variando de 2,5 a 2.540 mm/s.


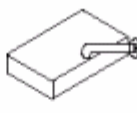



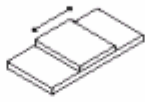

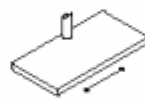
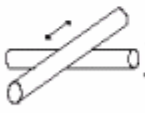

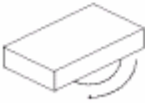


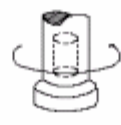
Geometria	Tipo de Movimento	Geometria	Tipo de Movimento
	Esco regamento unidirecional		Esco regamento recíproco
	Esco regamento unidirecional ou oscilatório		Esco regamento unidirecional
	Esco regamento unidirecional		Esco regamento oscilatório
	Esco regamento unidirecional		Esco regamento oscilatório de pequena amplitude (<i>fretting</i>)
	Esco regamento unidirecional ou unidirecional mais movimento oscilatório		Esco regamento oscilatório de pequena amplitude (<i>fretting</i>)
	Esco regamento unidirecional		Impacto normal e impacto normal mais esco regamento
	Esco regamento recíproco		Impacto normal

Figura 2.25 – Representação esquemática das configurações dos principais ensaios de desgaste (BAYER, 1985).

Em 1960, a *American Society for Lubrication Engineers* (ASLE) listou mais de 200 tipos de ensaios de desgaste e equipamentos em uso (BAYER, 1985). Este número é o resultado da necessidade de simulação das condições de desgaste para aplicações específicas e do estabelecimento de controles adequados para esse fenômeno.

2.8.1 Elementos dos Ensaios de Desgaste

Os elementos básicos de um ensaio de desgaste são a simulação, a preparação dos corpos de prova e o controle (BAYER, 1985). Desses, a simulação aparece como o mais relevante; porém, os demais elementos também merecem atenção, dada a influência dos mesmos no resultado final dos ensaios.

A simulação avalia se o comportamento experimentado nos testes é o mesmo encontrado na aplicação. Devido à complexidade e o desconhecimento de algumas particularidades do desgaste, o desenvolvimento de muitos ensaios ocorre através do método de “tentativa e erro”, sendo diretamente dependente do executor. A simulação ideal prevê exatamente a situação de desgaste a ser encontrada na aplicação. Apesar desta condição não ocorrer na prática, qualquer modificação no procedimento do ensaio deve ser avaliada cuidadosamente a fim de se obter informações usuais a respeito do desgaste.

Embora, o conhecimento teórico e a experiência prática possam auxiliar no entendimento das diferenças encontradas nos testes e na aplicação, as correlações entre as mesmas devem ser estudadas. A correlação mais importante é a comparação entre as superfícies desgastadas e os fragmentos de desgaste produzidos nos ensaios e na aplicação. A morfologia dos riscos, a presença ou ausência de camadas superficiais, as mudanças na microestrutura e o tamanho, forma e composição dos fragmentos de desgaste devem ser comparados. Se as características das superfícies desgastadas e dos fragmentos de desgaste

são diferentes, a simulação não é considerada válida. Os mecanismos básicos de desgaste resultam em fragmentos de desgaste característicos. Desta forma, a comparação destes fragmentos pode ser usual.

A preparação dos corpos de prova e o controle dos parâmetros durante o ensaio são importantes para a exatidão e repetibilidade dos resultados. Se os ensaios forem devidamente conduzidos, as incertezas nos resultados podem ser reduzidas para níveis típicos encontrados em outros ensaios de engenharia, na ordem de 20% (BAYER, 1985).

Várias normas foram criadas com o intuito de especificar e padronizar as características desejáveis, mantendo a repetibilidade e o baixo percentual de incertezas, dos diferentes ensaios de desgaste. Os procedimentos apresentados pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM), detalham os cuidados mínimos necessários para a execução de ensaios de desgaste. A precisão do aparato experimental, a preparação dos corpos de prova, as condições do abrasivo e os detalhes da avaliação do desgaste são apresentados nestes procedimentos.

Durante os ensaios, a avaliação do desgaste é comumente realizada através da perda de massa, da perda de volume, da profundidade ou da largura das marcas de desgaste ou através de medidas indiretas, tais como o tempo necessário para desgastar um revestimento ou a carga necessária para causar um desgaste severo ou uma mudança na superfície avaliada.

Devido à simplicidade, a perda de massa dos corpos de prova é a avaliação mais utilizada nos ensaios de desgaste. Entretanto, esta técnica possui duas grandes limitações. A primeira deve-se ao fato de que o desgaste é relacionado ao volume de material removido ou deslocado. Se os materiais testados possuem diferentes densidades, a perda de massa não promove um *ranking* real dos mesmos. A segunda limitação ocorre devido a não avaliação do desgaste devido ao deslocamento de material, tendo em vista o fato de que um corpo de prova pode ganhar massa por transferência de material a partir do outro corpo de prova.

A perda volumétrica, embora diretamente ligada ao desgaste, é freqüentemente de difícil avaliação. Exceto para geometrias mais simples, a determinação da perda volumétrica é complexa e consome bastante tempo. Uma dimensão linear, tal como a profundidade ou a largura das marcas de desgaste, pode ser facilmente avaliada. Entretanto, a aplicabilidade desse tipo de avaliação é limitada a uma única geometria de teste, devido às marcas de desgaste não serem freqüentemente uniformes.

A avaliação do desgaste através de técnicas indiretas de medição é viável em alguns casos como, por exemplo, na comparação das resistências ao desgaste de revestimentos extremamente finos através do tempo necessário para o desgaste atingir o substrato. Contudo, as técnicas indiretas geralmente são limitadas no escopo e na aplicabilidade e não possibilitam, facilmente, a definição dos parâmetros de desgaste fundamentais.

2.9 Revestimentos de Superfícies

Nas últimas décadas, a necessidade de redução de custos nos processos produtivos imposta pelo desenvolvimento industrial, associada ao aumento crescente na competitividade com base na qualidade, levou os centros de pesquisa ao estudo de novos materiais e revestimentos com a finalidade de minimizar os efeitos do desgaste nas ferramentas.

Revestir materiais com camadas duras resulta no aumento da resistência ao desgaste e na diminuição do coeficiente de atrito, possibilitando um melhor desempenho tribológico das ferramentas e a redução nas paradas de máquina devido às falhas prematuras.

A introdução do nitreto de titânio (TiN) e outros revestimentos resistentes ao desgaste no final da década de 1960, seguida pelos avanços nas técnicas de processamento, possibilitou a utilização destes materiais em ferramentas de alta precisão e componentes,

promovendo uma redução nos custos de fabricação de diversas áreas da indústria (STRAFFORD, 1996).

Os revestimentos promovem um aumento na vida de ferramentas de corte, como mostra a Figura 2.26 (STRAFFORD, 1996). A combinação de alta resistência ao desgaste, redução do atrito e excelente estabilidade química fazem com que as ferramentas de corte gerem um melhor acabamento final do produto e possam operar com maior velocidade de remoção de material (STRAFFORD, 1996).

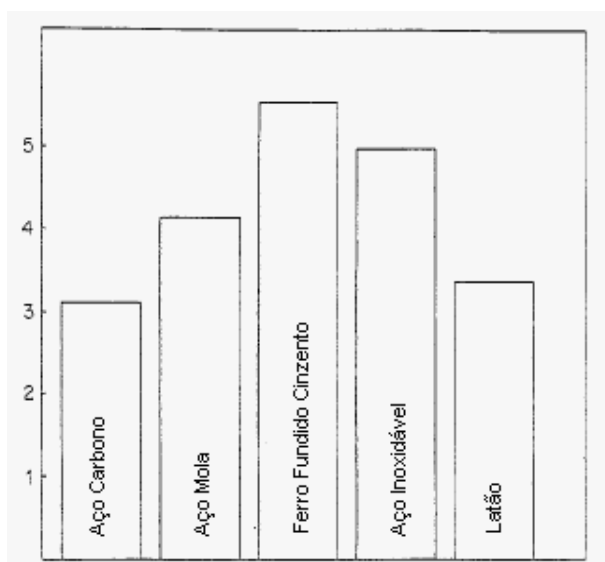


Figura 2.26 – Fatores de aumento da vida de brocas para a usinagem de diversos materiais obtidos através da comparação entre a vida de ferramentas sem a aplicação de revestimentos e ferramentas revestidas com TiN (STRAFFORD, 1996).

Nas operações de conformação mecânica, os revestimentos propiciam um melhor acabamento do produto final, a diminuição dos esforços e a redução do desgaste das ferramentas. A Figura 2.27 (STRAFFORD, 1996) mostra um comparativo entre a evolução do desgaste, medido através da altura da rebarba formada na peça estampada, de ferramentas de conformação com e sem a aplicação de revestimentos.

Assim como nas operações de usinagem e conformação, as técnicas de modificação das superfícies de ferramentas geram retornos financeiros significativos também na injeção. A

menor aderência do material injetado, a redução do desgaste e a diminuição da frequência de repolimento podem ser obtidas com a aplicação dos revestimentos nos moldes de injeção.

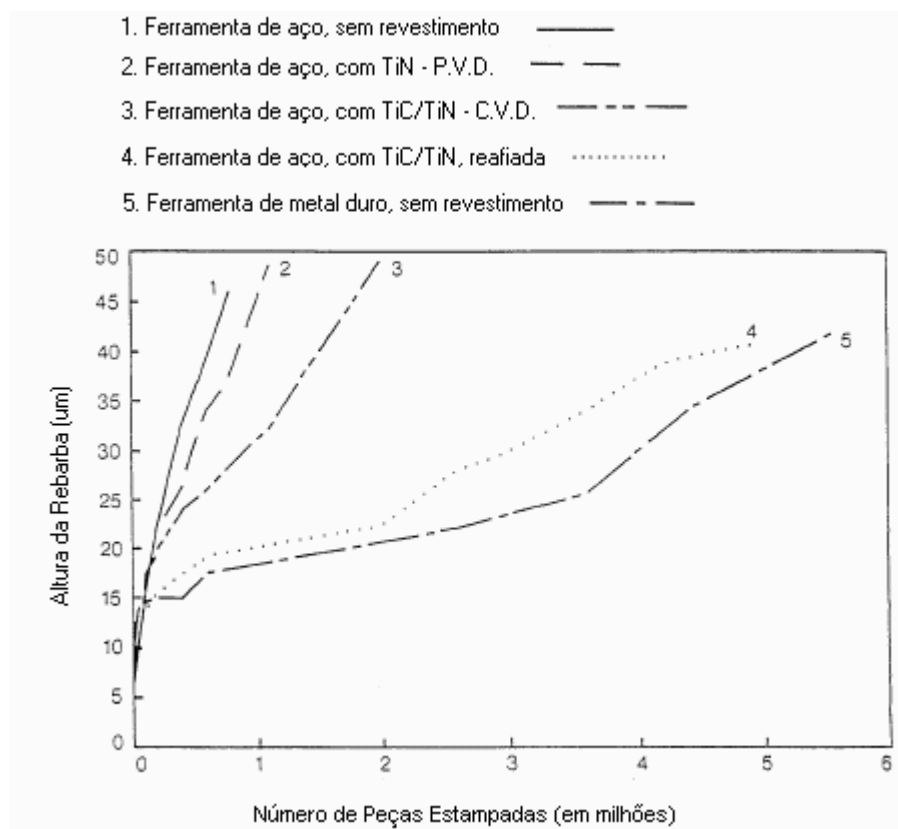


Figura 2.27 – Comparativo entre a evolução do desgaste de ferramentas de conformação mecânica com e sem a aplicação de revestimentos, avaliada através da altura da rebarba formada (STRAFFORD, 1996).

No revestimento de ferramentas de usinagem, conformação e injeção, cujo objetivo principal é, geralmente, a formação de um filme superficial que promova o aumento da resistência ao desgaste, os processos de deposição de vapor são os mais empregados.

Os processos de deposição de vapor podem ser divididos basicamente em três grandes grupos: a Deposição Química de Vapor (C.V.D.), a Deposição Física de Vapor (P.V.D.) e a Deposição Físico-Química de Vapor (P.C.V.D.).

A Deposição Química de Vapor (C.V.D.) utiliza um componente volátil do revestimento que é termicamente decomposto (pirólise) ou reage quimicamente com outros

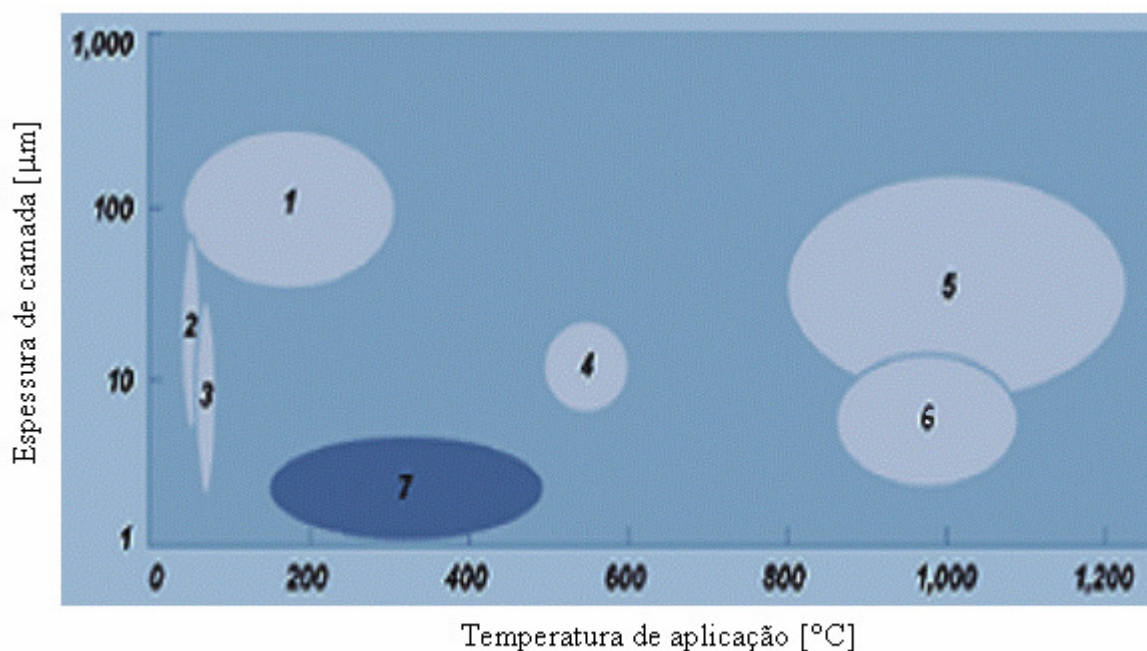
gases ou vapores para formar um revestimento na superfície aquecida do substrato (BHUSHAN; GUPTA, 1991).

A Deposição Física de Vapor (P.V.D.) é usada para depositar revestimentos através da condensação de vapores em alto vácuo na superfície do substrato (BHUSHAN; GUPTA, 1991). A deposição ocorre atômicamente, ou seja, átomo por átomo.

A Deposição Físico-Química de Vapor (P.C.V.D.) consiste em um processo híbrido que utiliza uma descarga brilhante de plasma, *glow discharge*, para ativar o processo de C.V.D. (BHUSHAN; GUPTA, 1991).

A Figura 2.28 (DESGASTE, 2005) apresenta um comparativo das espessuras de camada e temperaturas de aplicação de algumas técnicas de modificação superficial aplicadas nas ferramentas de usinagem, conformação e injeção.

Além dos processos de deposição de revestimentos na superfície de trabalho das ferramentas, tratamentos termoquímicos também são amplamente utilizados para aumentar a durabilidade de punções e matrizes de conformação mecânica.



- | | | | |
|---------------------------|-----------------|--|---------------------------------------|
| 1. Aspersão a plasma | 3. Fosfatização | 5. Boretação | 7. Deposição Física de Vapor (P.V.D.) |
| 2. Deposição eletrolítica | 4. Nitretação | 6. Deposição Química de Vapor (C.V.D.) | |

Figura 2.28 – Espessuras de camada e temperaturas de aplicação de algumas técnicas de modificação superficial (DESGASTE, 2005).

Os tratamentos termoquímicos podem ser definidos como um conjunto de operações realizadas no estado sólido que compreendem modificações na composição química da superfície da peça, em condições de temperatura e meio adequados. A Tabela 2.6 (TRATAMENTO, 2005) apresenta as definições e aplicações gerais dos tratamentos mais empregados.

Tabela 2.6 – Principais tratamentos termoquímicos e suas aplicações (TRATAMENTO, 2005).

Tratamento	Definição	Aplicação
Boretação	Tratamento termoquímico onde se promove o enriquecimento superficial com boro.	Peças que necessitam de alta resistência à abrasão.
Carbonitretação	Tratamento termoquímico onde se promove o enriquecimento superficial simultâneo com carbono e nitrogênio.	Peças que necessitam de alta dureza superficial, alta resistência à fadiga de contato e submetidas a cargas superficiais moderadas.
Cementação	Tratamento termoquímico onde se promove o enriquecimento superficial com carbono.	Peças que necessitam de alta dureza superficial, alta resistência à fadiga de contato e submetidas a cargas superficiais elevadas.
Nitretação	Tratamento termoquímico onde se promove o enriquecimento superficial com nitrogênio.	Peças que necessitam de alta resistência ao atrito adesivo, alta resistência à fadiga de contato e submetidas a cargas superficiais baixas.

A Deposição Química de Vapor (C.V.D.), a Deposição Físico-Química de Vapor (P.C.V.D.) e os tratamentos termoquímicos não serão abordados neste trabalho, ficando este restrito ao estudo de revestimentos aplicados pelo processo de Deposição Física de Vapor (P.V.D.).

2.9.1 Deposição Física de Vapor (P.V.D.)

Em peças e componentes com maiores exigências de controle dimensional, a aplicação de revestimentos pela técnica C.V.D. deve ser evitada. As altas temperaturas de

processo e a “retêmpera” podem provocar distorções e alterações dimensionais consideráveis, acima das tolerâncias permitidas.

As restrições de temperatura no processo C.V.D. provocaram pesquisas e desenvolvimentos, culminado com o surgimento do processo de Deposição Física de Vapor (P.V.D.), que utiliza baixas temperaturas. O processo de revestimento pode ser executado abaixo da temperatura de revenimento do aço rápido e de outros aços ferramenta (SUSKI, 2004).

O processo foi acidentalmente descoberto por Faraday, que observou a deposição de partículas na superfície interna de bulbos de lâmpadas incandescentes provenientes da explosão do filamento (DUROTIN, 2005).

Ferramentas de corte revestidas com TiN através da Deposição Física de Vapor (P.V.D.) foram introduzidas no Japão e na Europa no final da década de 1970 (WICK; VEILLEUX, 1986). Historicamente, eram processos relativamente onerosos, tendo em vista as baixas taxas de deposição do revestimento e os investimentos necessários para a construção de câmaras de vácuo. Eletrodeposição e C.V.D. eram tipicamente menos onerosos.

Recentemente, com o desenvolvimento de técnicas que permitem a deposição dos revestimentos a taxas mais altas e o aumento na demanda por materiais e revestimentos de alta performance, o uso do P.V.D. aumentou consideravelmente.

Os revestimentos depositados pelos processos P.V.D. apresentam desempenhos similares aos revestimentos aplicados por C.V.D. na maioria das aplicações, inclusive no revestimento de ferramentas de metal duro empregadas em cortes intermitentes, tendo em vista que o processo C.V.D. muitas vezes reduz a resistência à flexão do metal duro.

O processo P.V.D. é extremamente versátil e possibilita uma série de combinações entre os materiais do revestimento e substrato (BHUSHAN; GUPTA, 1991). Metais, ligas, cerâmicas, intermetálicos e alguns tipos de polímeros podem ser depositados na superfície de

quaisquer materiais (tais como metais, cerâmicas, plásticos e papéis), desde que estes estejam submetidos a temperaturas de operação estáveis no vácuo.

2.9.1.1 Técnicas de Aplicação

O comportamento tribológico de um revestimento depende diretamente de sua microestrutura, determinada pela técnica de deposição e suas variáveis de processo.

A Deposição Física de Vapor (P.V.D.) compreende uma grande variedade de técnicas que, basicamente, podem ser divididas em três grupos: a deposição por evaporação em vácuo, a deposição por desintegração catódica e a deposição iônica. Cada uma destas técnicas será detalhada a seguir.

2.9.1.1.1 Deposição por Evaporação em Vácuo

A evaporação consiste em um dos processos mais antigos de deposição em vácuo. Relativamente simples e barato, proporciona altas taxas de deposição, sendo utilizado principalmente para a obtenção de revestimentos com maiores espessuras de camada (BHUSHAN; GUPTA, 1991).

Na deposição por evaporação, o material de revestimento é evaporado pelo aquecimento da fonte de material a uma determinada temperatura (geralmente entre 1.000 e 2.000 °C), no vácuo, tal que a pressão de vapor excede consideravelmente a pressão ambiente da câmara, produzindo vapor suficiente para a condensação (BHUSHAN; GUPTA, 1991). O revestimento é lançado da superfície da fonte de material em direção ao substrato, percorrendo uma distância que pode variar entre 150 e 450 mm. Uma representação esquemática do processo é mostrada na Figura 2.29 (PASCHOAL, 1998).

O aquecimento da fonte de material pode ser realizado por indução, resistência, feixe de elétrons, laser, entre outros (PASCHOAL, 1998).

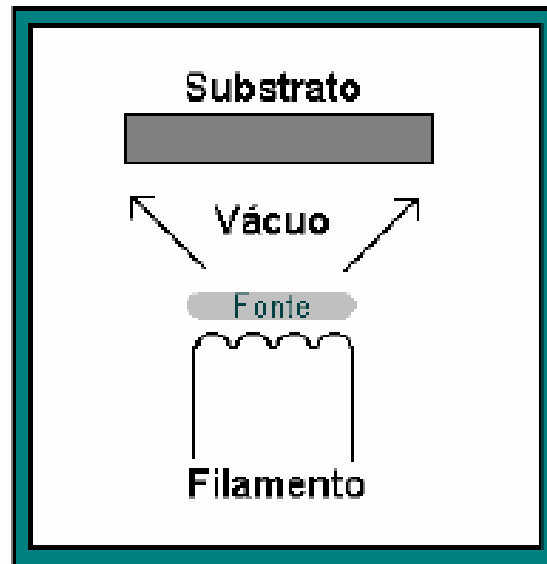


Figura 2.29 – Representação esquemática do processo de evaporação em vácuo (PASCHOAL, 1998).

O processo possui baixa energia cinética, refletindo em uma baixa adesão do revestimento. Além disso, para a deposição de filmes mais densos, é necessário o aquecimento do substrato a temperaturas mais elevadas, da ordem de 1.600 °C (BHUSHAN; GUPTA, 1991). Uma outra limitação deste processo é o fato de que o substrato deve ser movimentado para a obtenção de uniformidade no revestimento depositado.

Em alguns casos, plasma é utilizado no processo para aumentar a reação e causar a geração de íons e acelerá-los em direção ao substrato. Este processo é denominado *Activated Reactive Evaporation (ARE)*, sendo reconhecido por proporcionar melhor adesão do revestimento, melhores propriedades mecânicas e altas taxas de deposição, quando comparado ao processo de deposição por evaporação convencional.

2.9.1.1.2 Desintegração Catódica

Na desintegração catódica, o material de revestimento é sublimado devido ao bombardeamento de partículas energéticas, usualmente íons positivos de um gás inerte ou reativo. Argônio é o gás mais utilizado, dado a sua compatibilidade com os principais materiais de engenharia e o seu baixo custo. Criptônio e xenônio são utilizados em algumas aplicações específicas.

No processo, o material de revestimento, também denominado de alvo ou cátodo, e o substrato a ser revestido são colocados em uma câmara de vácuo com uma pressão na ordem de 0,013 a 13 mPa (10^{-1} a 10^{-4} mtorr) (PASCHOAL, 1998). O material é sublimado e ejetado na forma atômica a partir do alvo. O substrato é posicionado na frente do alvo para interceptar o fluxo de átomos ejetados. A Figura 2.30 (PASCHOAL, 1998) mostra uma representação esquemática do processo de deposição por desintegração catódica.

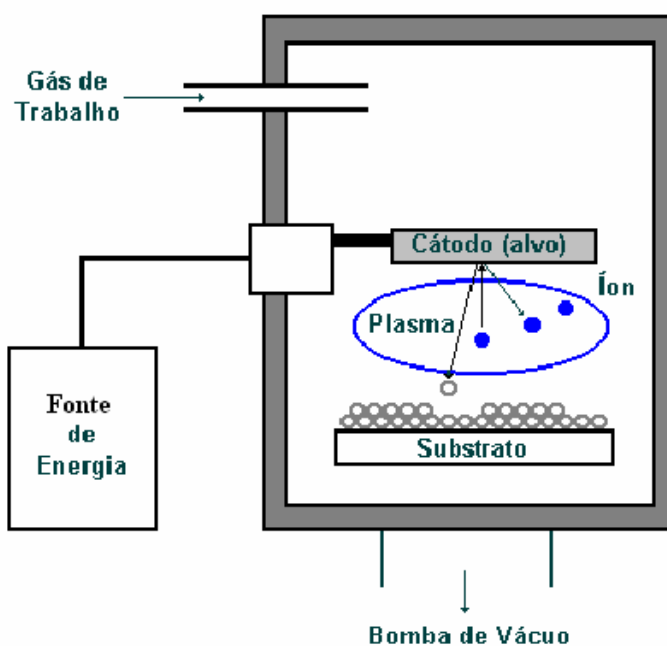


Figura 2.30 – Representação esquemática do processo de desintegração catódica (PASCHOAL, 1998).

Estima-se que apenas 1% da energia incidente do bombardeamento sobre a superfície do alvo produz átomos ejetados, enquanto 75% causam o aquecimento do alvo e o restante está associado à emissão de elétrons secundários (BHUSHAN; GUPTA, 1991).

Comparado com o processo de deposição por evaporação, descrito anteriormente, as taxas de vaporização por unidade de área obtidas são relativamente baixas, implicando em baixa velocidade de deposição. Este processo é indicado para a deposição de revestimentos de forma uniforme em superfícies largas e planas.

As espessuras de camada obtidas através da desintegração catódica variam entre 0,02 e 10 μm (BHUSHAN; GUPTA, 1991).

No processo convencional, a descarga gerada espalha-se por toda a câmara, conforme representado na Figura 2.31.A (PASCHOAL, 1998). Devido às baixas pressões, o caminho livre médio dos átomos ejetados do alvo é pequeno, na ordem de 2,0 mm. Eles atingem o substrato com baixa energia, prejudicando a aderência e a densidade do filme depositado. Além disso, elétrons de alta energia bombardeiam continuamente o substrato, elevando sua temperatura e, conseqüentemente, restringindo este processo a substratos que possam suportar esta elevação na temperatura sem sofrer modificações.

Para aumentar a versatilidade e o campo de aplicação da deposição por desintegração catódica, desenvolveu-se o processo chamado *Magnetron Sputtering*. Ímãs colocados nas proximidades do alvo produzem linhas de campo magnético que formam um caminho fechado na frente do alvo, conforme Figura 2.31.B (PASCHOAL, 1998). Formam-se assim, “armadilhas de elétrons”. O campo magnético exerce uma força sobre os elétrons secundários emitidos do cátodo, fazendo com que estes percorram a trajetória das linhas de campo magnético. Com a formação destas “armadilhas de elétrons”, o plasma é confinado próximo a superfície do cátodo, aumentando a eficiência do processo.

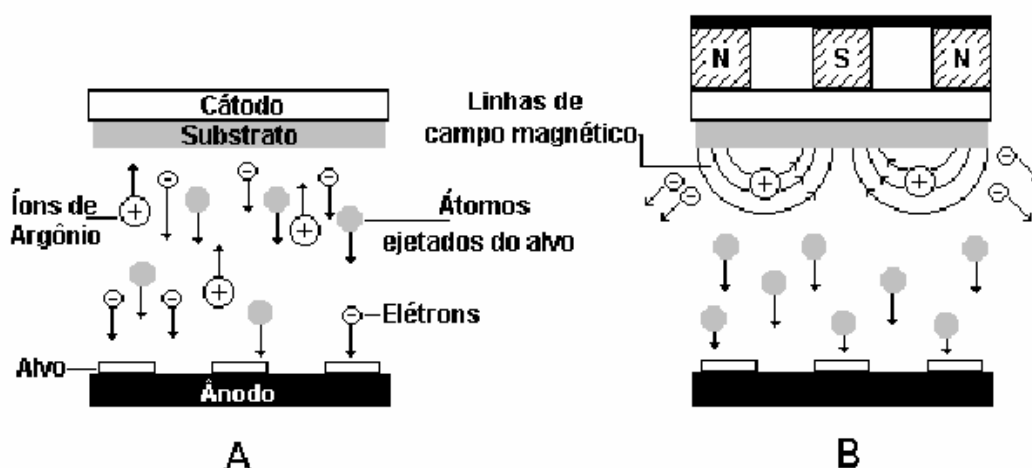


Figura 2.31 – A: Desintegração catódica convencional; B: *Magnetron Sputtering* (PASCHOAL, 1998).

2.9.1.1.3 Deposição Iônica

Em 1963, Mattox (AHMED, 1987) introduziu uma técnica onde uma descarga brilhante ionizava os átomos do gás e do material de revestimento e acelerava-os através de uma diferença de potencial em direção ao substrato, que era o cátodo da descarga. O processo passou a ser chamado de deposição iônica (*Ion Plating*), sendo reconhecido por produzir filmes com excelente adesão, mesmo quando os materiais do filme e do substrato fossem mutuamente incompatíveis.

O termo *Ion Plating* é atualmente utilizado para definir métodos de deposição com plasma energizado na qual a superfície a ser revestida é submetida a um bombardeamento iônico, composto por um fluxo secundário de íons, com energia superior a 1 – 2 keV, e um fluxo primário de partículas neutras, antes e durante a deposição do revestimento.

Esta técnica possibilita a aplicação de uma grande variedade de revestimentos em substratos metálicos e não-metálicos, incluindo polímeros. As temperaturas de deposição variam entre 100 e 500 °C e as espessuras dos revestimentos obtidos situam-se entre 0,02 e 10 μm (BHUSHAN; GUPTA, 1991).

O processo é geralmente realizado em um sistema de descarga de gás inerte similar à desintegração catódica, sendo que a diferença fundamental está no fato de que o substrato é utilizado como cátodo (AHMED, 1987). A Figura 2.32 (WICK; VEILLEUX, 1986) mostra uma representação esquemática do processo de deposição iônica.

O bombardeamento iônico limpa e modifica a superfície do substrato em escala atômica, antes da deposição do material do filme, a partir de uma fonte de evaporação. Após o término da limpeza, o material do revestimento é evaporado sem a interrupção do bombardeamento iônico e, para um filme se formar, é necessário que a taxa de deposição exceda a taxa de desintegração catódica (BHUSHAN; GUPTA, 1991).

Então, dois fenômenos diferentes ocorrem simultaneamente na superfície da peça. De um lado, a deposição do material de revestimento, átomos neutros e íons; de outro, a desintegração catódica do depósito por gás inerte e material de revestimento, íons e átomos neutros de alta energia. A velocidade de deposição efetiva é determinada pela velocidade relativa destes dois fenômenos (SUSKI, 2004).

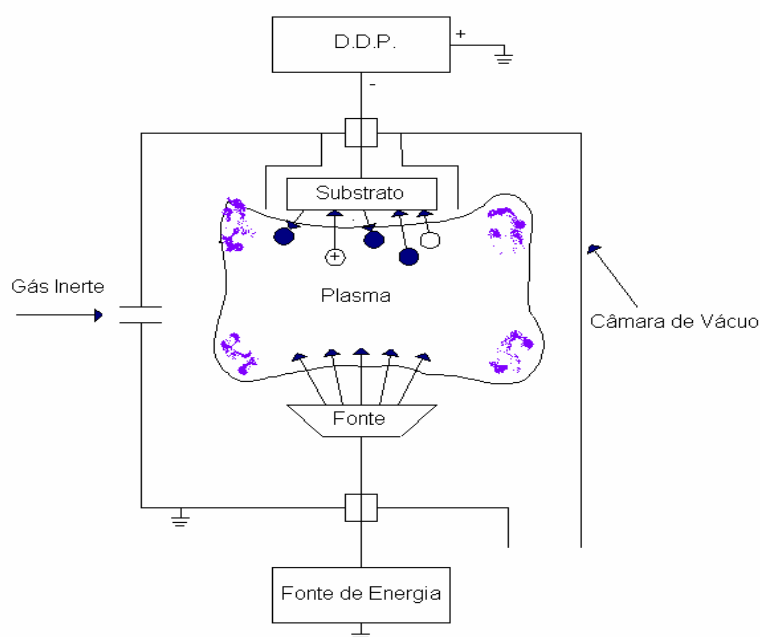


Figura 2.32 – Representação esquemática do processo de deposição iônica (WICK; VEILLEUX, 1986).

2.9.1.2 Propriedades dos Revestimentos

Os revestimentos aplicados pelas técnicas P.V.D. têm promovido efeitos consideráveis nos processos industriais. O aumento da vida de ferramentas, a redução no número de paradas de máquinas, a diminuição dos custos de manutenção, os ganhos de produtividade, o melhor acabamento do produto final e a diminuição ou eliminação de fluidos lubrificantes são alguns dos benefícios obtidos através da aplicação desses revestimentos.

Algumas propriedades dos revestimentos, como a elevada dureza – chegando a cinco vezes a do aço rápido temperado e revenido – o baixo coeficiente de atrito e a alta estabilidade química e térmica, são os principais responsáveis pela obtenção dos benefícios citados anteriormente. Vale ressaltar ainda outras vantagens inerentes à aplicação dos revestimentos através da Deposição Física de Vapor, como a possibilidade de tratamento sem modificação da estrutura do material - o que não é possível no processo C.V.D., por exemplo-, a mínima agressão ambiental, não gerando resíduos e constituindo-se, portanto, como uma alternativa aos revestimentos galvânicos e a possibilidade de remoção seguida de reaplicação da camada.

O desempenho dos revestimentos é, em grande parte, determinado por sua dureza (TSCHIPTSCHIN, 2004). A Tabela 2.7 (HULTMAN; SUNDGREN, 2001 *apud* TSCHIPTSCHIN, 2004) mostra as propriedades de materiais freqüentemente utilizados em recobrimentos duros, comparado-as com as propriedades típicas dos aços. Observa-se que os materiais de recobrimento são muito mais duros, apresentam pelo menos o dobro do módulo de elasticidade e têm coeficientes de expansão térmica variando entre 0,5 e 1,0 do coeficiente de expansão térmica do aço. Os pontos de fusão são muito mais altos e indicam uma elevada estabilidade química.

Tabela 2.7 – Propriedades estruturais, mecânicas e térmicas de materiais utilizados em recobrimentos duros (HULTMAN; SUNDGREN, 2001 *apud* TSCHIPTSCHIN, 2004).

Material	Dureza [GPa]	Módulo de Young [GPa]	Condutividade Térmica [W/mK]	Coefficiente de Expansão Térmica [$10^{-6} K^{-1}$]	Ponto de Fusão [°C]
TiN	20	440	29	9,4	2.949
TiC	29	450	18-30	7,4	3.067
VN	15	460		8,0	
VC	29	430			2.648
NbN	14	480		10,1	2.204
NbC	24	580		6,6	3.600
CrN	11	400	84	10,3	1.810
WC	21	695	14	4,3	2.776
Al ₂ O ₃	21	400	350	9,0	2.300
SiC	26	480	27	5,3	
BN	40	660			
B ₄ C	35	440		5,0	
Diamante	90	590	33	0,8	
Aço ferramenta	8	220	16	13,0	1.500

Recentemente, além da dureza, outras propriedades dos revestimentos vêm sendo exaustivamente estudadas. A alta tenacidade e a resistência à corrosão, à oxidação e à tribo-oxidação são tendências no desenvolvimento de novos filmes tribológicos.

A Tabela 2.8 (DUROTIN, 2004) apresenta algumas propriedades do nitreto de titânio, do nitreto de cromo e do carbonitreto de titânio obtidas com a BRASIMET COM. E IND. S.A., fornecedora dos revestimentos analisados neste trabalho.

Tabela 2.8 – Propriedades dos revestimentos analisados neste trabalho (DUROTIN, 2004).

Revestimento	Espessura de Camada [μm]	Coefficiente de Atrito	Temperatura de Operação Máxima [°C]
Nitreto de Titânio	1,0 – 6,0	0,5	550
Nitreto de Cromo	1,0 – 20,0	0,4	450
Carbonitreto de Titânio	1,0 – 4,0	0,4	700

Os valores de microdureza disponíveis na literatura (NORDIN; LARSSON; HOGMARK, 1999; SU *et al*, 1997; HEINKE *et al*, 1995; BENDER; MUMME, 2005; DUROTIN, 2004), apresentam grandes variações, principalmente para o nitreto de titânio e

para o nitreto de cromo. Alguns destes valores são apresentados na Tabela 2.9. Acredita-se que esta grande variação nos valores de microdureza pode ser devida as diferentes técnicas e parâmetros de processo utilizados na obtenção destes revestimentos, conforme apresentado na seção 2.9.1.1, formando camadas com diferentes características, tais como as fases presentes e orientações preferenciais, e, conseqüentemente, diferentes propriedades.

Tabela 2.9 – Valores de microdureza disponíveis na literatura para os revestimentos analisados neste trabalho.

Referência	Microdureza [HV 0,05]		
	Nitreto de Titânio	Nitreto de Cromo	Carbonitreto de Titânio
(NORDIN; LARSSON; HOGMARK, 1999)	2.310 ± 380	1.950 ± 160	-----
(SU <i>et al</i> , 1997)	2.756	2.065	2.854
(HEINKE <i>et al</i> , 1995)	2.000 ± 346	2.306 ± 224	-----
(BENDER; MUMME, 2005)	2.300	1.750	3.000
(DUROTIN, 2004)	2.500	2.300	3.000

O nitreto de titânio é o revestimento mais difundido na indústria devido as suas propriedades de dureza, adesão de camada e resistência à temperaturas elevadas, constituindo-se em um revestimento de uso universal. Além disso, é um material biocompatível, tendo o seu uso aprovado pelas indústrias alimentícias (DAL COMUNI; FAGUNDES, 2004). O TiN obtido pelo processo P.V.D. de baixa temperatura, ou *íon plating*, vêm apresentando excelentes resultados quando aplicados em ferramentas de aço rápido (BHUSHAN; GUPTA, 1991).

O nitreto de cromo é um dos revestimentos mais utilizados na indústria para a elevação da resistência ao desgaste de componentes. Este revestimento é geralmente aplicado em temperaturas relativamente baixas, na ordem de 200 °C, possuindo excelente adesividade. Além disso, a camada de nitreto de cromo pode ser aplicada em superfícies que apresentam

baixa rugosidade, permitindo a redução das tensões internas, mesmo para camadas mais espessas.

O carbonitreto de titânio apresenta dureza superior ao TiN e ao CrN, elevada resistência à abrasão e baixo coeficiente de atrito. As ferramentas revestidas com Ti(C,N) apresentam grande resistência ao desgaste. É utilizado para a usinagem de ligas de baixa usinabilidade, como aços no estado endurecido, e outras operações de alta abrasividade (DAL COMUNI, FAGUNDES, 2004).

Os desenvolvimentos mais recentes podem ser divididos basicamente em duas linhas de pesquisa. Na primeira, mais difundida, estudam-se os sistemas compostos por camadas sólidas, ou seja, configurações constituídas pelo substrato e por um filme sólido, uniforme e de distribuição homogênea do início até o final da sua formação. Os revestimentos mais tradicionais, como o nitreto de titânio (TiN) e o nitreto de cromo (CrN), encontram-se nessa linha. Na segunda, são estudados sistemas cujas características e propriedades podem variar significativamente do início ao final de sua deposição. Estes revestimentos são denominados de tribo-mutantes, sendo constituídos de multi-camadas com características distintas. A Figura 2.33 (CAMPOS JR., 2001 *apud* DAL COMUNI; FAGUNDES, 2004) mostra uma representação esquemática deste tipo de revestimento. Neste exemplo, a camada mais externa apresenta um coeficiente de atrito mínimo e baixa resistência ao desgaste, atuando como um lubrificante. Com a evolução do desgaste, devido às propriedades da segunda camada, ocorre um aumento gradual do nível de resistência à abrasão e ao atrito.

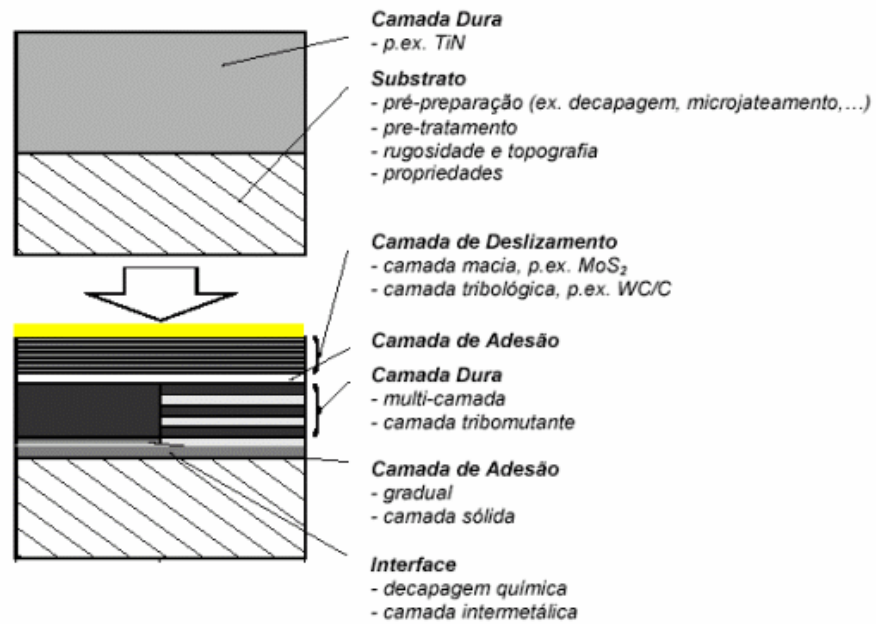


Figura 2.33 – Representação esquemática das duas principais configurações para a formação das camadas dos revestimentos (CAMPOS JR., 2001 *apud* DAL COMUNI; FAGUNDES, 2004).

3 METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 Metodologia Experimental

As matrizes de recorte analisadas neste trabalho foram doadas pela Cia. Industrial H. Carlos Schneider, conhecida pela marca CISER PARAFUSOS E PORCAS, a maior fabricante de elementos de fixação da América Latina. Essas ferramentas, apresentadas na Figura 3.1 (CISER, 2006), são utilizadas no processo de recorte do perfil da cabeça de parafusos sextavados.

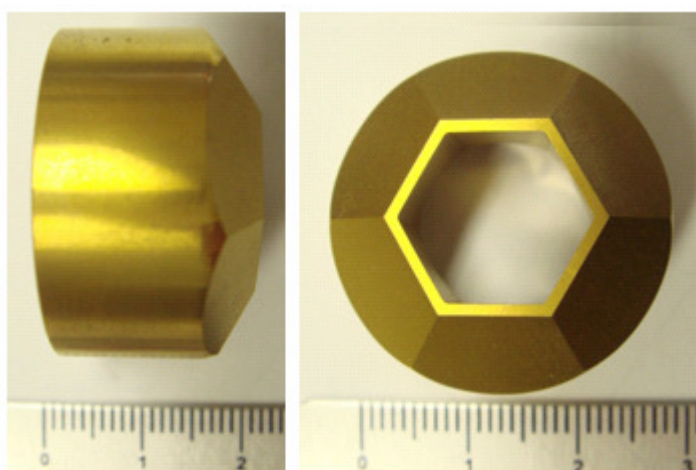


Figura 3.1 – Vista lateral e vista frontal de uma matriz de recorte (CISER, 2006).

As matrizes de recorte analisadas foram fabricadas conforme desenho de processo CISER número 4525 02, em aço rápido M2, conforme especificação do *American Institute of Steel and Iron* (AISI). A composição química média do aço rápido AISI M2 é apresentada na Tabela 3.1 (VILLARES METALS, 2003). Posteriormente, as mesmas foram encaminhadas para tratamento térmico, sendo temperadas e revenidas, com especificação de dureza de 61 a 63 HRC (720 a 770 HV0,05).

As matrizes de recorte foram utilizadas no último estágio de conformação de uma prensa progressiva de quatro estágios do fabricante NATIONAL, modelo FORMAX FX24L,

com razão de produção ajustada para a fabricação de 11.500 peças/hora. Uma representação esquemática da seqüência de conformação de um parafuso sextavado é apresentada na Figura 3.2 (PADRÃO DE PRODUÇÃO 547/2, 2005).

Tabela 3.1 – Composição química média do aço rápido AISI M2 (VILLARES METALS, 2003).

%C	%Mn	%Mo	%W	%Cr	%V
0,89	0,30	4,90	6,20	4,20	1,80

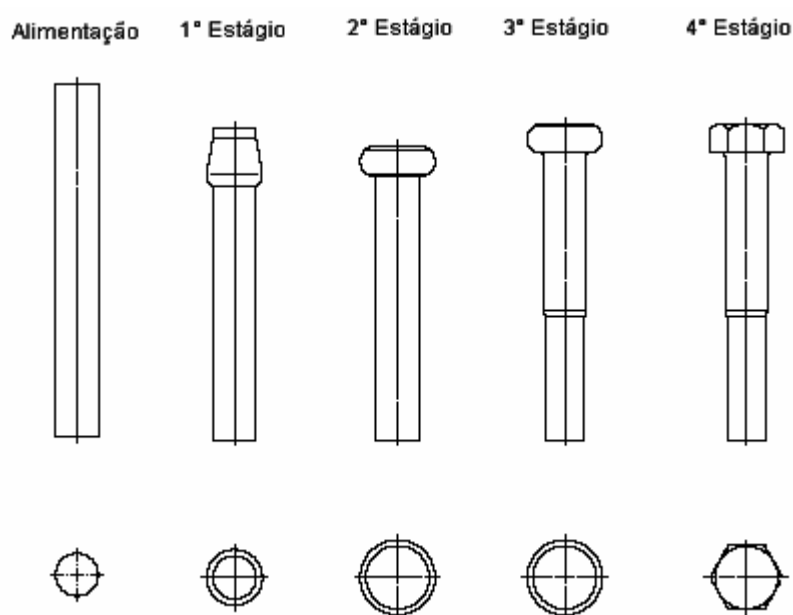


Figura 3.2 – Representação esquemática da seqüência de conformação de um parafuso sextavado (PADRÃO DE PRODUÇÃO 547/2, 2005).

Três diferentes revestimentos, obtidos através do processo P.V.D., foram aplicados nas matrizes de recorte para avaliação dos seus efeitos sobre a resistência ao desgaste durante o processo de conformação. Os revestimentos aplicados foram:

- Nitreto de titânio (TiN);
- Nitreto de cromo (CrN);
- Carbonitreto de titânio (Ti(C,N)).

Os revestimentos foram aplicados pela empresa BRASIMET COM. e IND. S.A., seguindo especificações de processo padrão. Algumas propriedades destes revestimentos são apresentadas na Tabela 2.8 (DUROTIN, 2004).

A evolução do desgaste das matrizes de recorte revestidas foi avaliada durante o processo de conformação a frio de parafusos sextavados fabricados com dois tipos de aço, ambos com bitola de 7,80 mm de diâmetro, comumente utilizados no segmento de elementos de fixação: o aço baixo carbono, conforme especificação da *Society of Automotive Engineers* (SAE), SAE 1015 e o aço médio carbono conforme SAE 1038. A composição química destes dois aços é apresentada na Tabela 3.2 (SAE J403, 1995).

Tabela 3.2 – Composição química dos aços SAE 1015 e SAE 1038 (SAE J403, 1995).

Aço	%C	%Mn	%P	%Si	%Cr	%S
SAE 1015	0,13/0,18	0,30/0,60	0,04 máx.	0,10 máx.	-----	0,05 máx.
SAE 1038	0,35/0,42	0,80/1,05	0,04 máx.	0,15/0,30	0,25/0,40	0,05 máx.

As propriedades mecânicas mais importantes ao processo de conformação destes aços são apresentadas na Tabela 3.3 (NBR NM 202, 2000). Em função destas diferenças, o desgaste das matrizes de recorte utilizadas na conformação destes dois tipos de aços provavelmente terá também um comportamento diferenciado.

Assim, este estudo objetivou, além da avaliação do efeito dos diferentes revestimentos, a verificação da influência das propriedades mecânicas dos materiais conformados na resistência ao desgaste das matrizes de recorte.

Tabela 3.3 – Principais propriedades mecânicas dos aços SAE 1015 e SAE 1038 (NBR NM 202, 2000).

Tipo de Aço	Dureza Máxima [HRB]	Limite de Resistência Máximo [MPa]	Redução de Área Mínima [%]
SAE 1015	86	550	60
SAE 1038	93	670	58

Desta forma, em escala industrial, seis diferentes condições foram avaliadas, considerando-se os dois tipos de aços e os três tipos de revestimentos. Para cada tipo de aço, três matrizes de recorte com cada um dos três revestimentos foram testadas e analisadas.

Os revestimentos foram analisados também em escala laboratorial, através da realização de ensaios de desgaste conforme as normas ASTM G 65 - Ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva e ASTM G 99 - Ensaio de desgaste pino-sobre-disco.

Os corpos de prova utilizados no ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva e os pinos utilizados no ensaio de desgaste pino-sobre-disco foram fabricados com o mesmo material das matrizes de corte, o AISI M2, e temperados e revenidos com a mesma especificação de dureza, de 61 a 63 HRC (720 a 770 HV0,05). Após a fabricação, os corpos de prova e os pinos foram encaminhados para a empresa BRASIMET COM. E IND. S.A. para a aplicação dos revestimentos, seguindo as mesmas especificações de processo do tratamento aplicado nas matrizes de recorte.

Os discos utilizados no ensaio de desgaste pino-sobre-disco foram fabricados em aço SAE 1075, cuja composição química é apresentada na Tabela 3.4 (SAE J403, 1995). A utilização do aço SAE 1075, e não dos aços SAE 1015 e 1038 avaliados nos testes industriais, teve o intuito de facilitar o processo de fabricação dos corpos de prova devido a não disponibilidade no mercado das bitolas destes aços para a fabricação dos discos. Os discos, ao contrário dos pinos utilizados neste mesmo ensaio, não foram revestidos superficialmente.

Tabela 3.4 – Composição química do aço SAE 1075 (SAE J403, 1995).

Aço	%C	%Mn	%P	%Si	%Cr	%B	%S
SAE 1075	0,70/0,80	0,40/0,70	0,04 máx.	-----	-----	-----	0,05 máx.

Outros ensaios laboratoriais foram realizados com o intuito de avaliar se as propriedades mecânicas das matrizes de recorte, corpos de provas, matéria-prima e

revestimentos estavam de acordo com as especificações dos fornecedores, apresentadas anteriormente.

Ensaio de tração e de dureza foram realizados em amostras de matéria-prima retiradas da extremidade da bobina para avaliar as propriedades mecânicas do material. As matrizes de recorte e os corpos de prova também tiveram suas durezas mensuradas, com o intuito de avaliar a uniformidade do tratamento térmico do substrato.

O ensaio de microdureza foi utilizado para avaliar a dureza superficial dos revestimentos nas matrizes de recorte e corpos de prova utilizados nos ensaios de desgaste.

O ensaio de adesividade das camadas superficiais ao substrato foi realizado com o intuito de qualificar os três revestimentos estudados, dada a importância desta propriedade para o bom desempenho de um filme tribológico.

Análises microestruturais das matrizes de recorte e dos corpos de prova utilizados nos ensaios de desgaste foram realizadas através de microscopia óptica e eletrônica de varredura, a fim de verificar as condições do substrato e avaliar as espessuras das camadas de revestimentos aplicadas nos mesmos.

Os procedimentos experimentais adotados para a realização destes ensaios são apresentados na seção a seguir.

3.2 Procedimentos Experimentais

3.2.1 Ensaio de tração

Foram realizados ensaios de tração para avaliar os valores de limite de resistência e redução de área dos arames SAE 1015 e 1038. Os ensaios de tração foram realizados através

de uma máquina universal para ensaios de tração KRATOS, conforme os procedimentos da norma DIN EN 10.002-1 (1990), para ensaios de tração de materiais metálicos em temperatura ambiente. A leitura dos resultados foi realizada diretamente na máquina.

Os ensaios foram realizados em amostras de matéria-prima retiradas da extremidade da bobina, com bitola de 7,80 mm de diâmetro e comprimento variando entre 300 e 400 mm, sem a necessidade de preparação de corpos de prova específicos. Foram analisadas no total seis amostras de matéria-prima, três de aço SAE 1015 e três de aço SAE 1038.

3.2.2 Dureza

As medidas de dureza foram obtidas conforme as especificações da norma ISO 6508-1 (1999), com o auxílio de um durômetro MITUTOYO, série 963-101, aplicando-se a carga diretamente na superfície externa das peças. Foram efetuadas três medições de dureza para cada peça, em temperatura ambiente, com a leitura de resultados realizada diretamente na máquina.

Para a matéria-prima utilizou-se uma carga de 100 kgf, obtendo-se valores de dureza na escala Rockwell B (HRB). Na avaliação das matrizes de recorte e dos corpos de prova para ensaios de desgaste utilizou-se uma carga de 150 kgf, obtendo-se valores de dureza na escala Rockwell C (HRC).

3.2.3 Microdureza

A microdureza dos revestimentos foi avaliada através de medições realizadas nos corpos de prova utilizados no ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva. Essas medições foram realizadas em regiões dos corpos de prova revestidas que não foram

submetidas ao ensaio de desgaste. Foram realizadas dez medições em cada corpo de prova, totalizando quarenta medições para cada revestimento. Para a realização destas medições, na escala Vickers, utilizou-se um microdurômetro do fabricante SHIMADZU, modelo HMV 2, com carga de 50 g.

3.2.4 Adesividade de Camada

A adesividade das camadas de revestimento ao substrato foi avaliada através do método de indentação (BHUSHAN; GUPTA, 1991). Neste método, são avaliados qualitativamente o surgimento de trincas laterais e radiais ou deslocamento na interface revestimento/substrato, ao redor da indentação provocada pelo penetrador.

As indentações foram realizadas através de um durômetro do fabricante PANAMBRA, modelo Pantec RBS, utilizando-se um penetrador cônico de diamante Rockwell, com pré-carga de 3 kgf e variação da carga final aplicada entre 15, 30 e 45 kgf. As análises qualitativas das indentações foram realizadas por meio de microscopia óptica, usando um microscópio OLYMPUS, modelo BX60M.

Assim como na avaliação da microdureza, o ensaio de adesividade foi realizado nos corpos de prova utilizados no ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva, em regiões dos corpos de prova revestidas que não foram submetidas ao ensaio de desgaste.

3.2.5 Caracterização Microestrutural

A preparação de amostras para metalografia fez-se através de procedimentos usuais de análise microestrutural. Estas amostras foram retiradas de regiões revestidas e não desgastadas das matrizes de recorte. O ataque químico foi realizado utilizando-se nital 5%

(95% álcool etílico e 5% ácido nítrico). As análises foram realizadas por meio de microscopia óptica, usando um microscópio OLYMPUS, modelo BX60M, e através de um microscópio eletrônico de varredura, do fabricante PHILIPS modelo XL 30.

3.2.6 Avaliação do Desgaste das Matrizes de Recorte

A evolução do desgaste em escala industrial foi acompanhada através da variação da medida da distância entre faces da cabeça sextavada do parafuso, Figura 3.3 (PADRÃO DE PRODUÇÃO 547/2, 2005). O perfil sextavado possibilita a medição de três diferentes cotas entre as faces opostas da cabeça do parafuso. A evolução do desgaste foi efetuada através da média aritmética destas três cotas. A cada 1.000 parafusos produzidos, a medição destas três cotas era realizada, registrando-se os valores encontrados. Este procedimento foi repetido até que se formaram rebarbas sob a cabeça do parafuso, em virtude do desgaste e perda da capacidade de corte do gume da ferramenta.

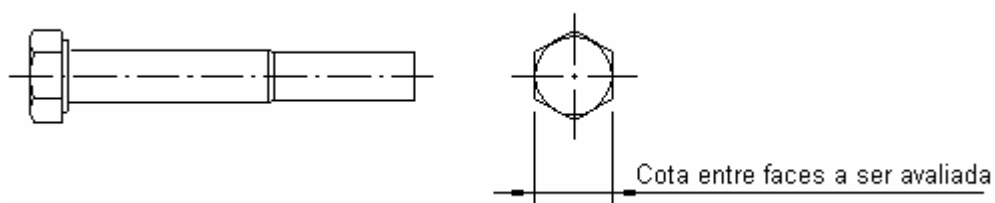


Figura 3.3 – Representação da distância entre faces da cabeça sextavada (PADRÃO DE PRODUÇÃO 547/2, 2005).

Foram analisadas seis matrizes de recorte para cada revestimento, sendo três para o aço SAE 1015 e três para o aço SAE 1038. Desta forma, a evolução do desgaste dos revestimentos, em função do tipo de aço, foi calculada através da média aritmética dos três resultados individuais das ferramentas de mesmo revestimento.

Para realizar a medição da cota entre faces opostas da cabeça sextavada do parafuso, foi utilizado um micrômetro digital MITUTOYO, modelo *Coolant Proof* série 293, com resolução de 0,001 mm.

3.2.7 Ensaio de Desgaste Pino-sobre-Disco

As especificações deste ensaio de desgaste são apresentadas na norma ASTM G 99 (1995). Essa norma fornece um método padronizado, em nível laboratorial, para a execução dos ensaios de desgaste de materiais usando a configuração de um pino sobre um disco.

As configurações geométricas dos corpos de prova utilizados neste trabalho são apresentadas na Figura 3.4 (DAL COMUNI; FAGUNDES, 2004). Os pinos foram fabricados em aço rápido AISI M2, temperados, revenidos e revestidos com revestimentos que apresentam as mesmas especificações das matrizes empregadas no recorte da cabeça sextavada dos parafusos. Os discos foram fabricados em aço carbono SAE 1075, sem revestimentos.

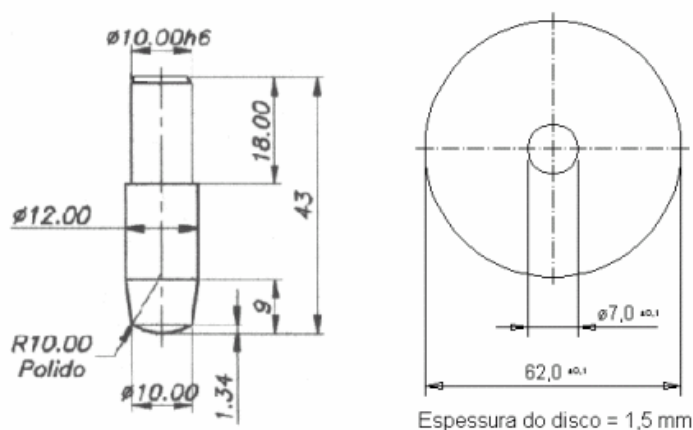


Figura 3.4 – Configurações geométricas do pino e do disco utilizados no ensaio de desgaste (DAL COMUNI; FAGUNDES, 2004).

O efeito dos revestimentos sobre a resistência ao desgaste no ensaio de desgaste pino-sobre-disco foi avaliada pelos valores médios de dois ensaios para cada revestimento. Foram realizados um total de seis ensaios para os três revestimentos.

Segundo a norma, a superfície do disco deve ser torneada, com avanços de acabamento, retificada ou polida, a fim de se obter uma condição adequada de superfície. Uma superfície rugosa dificulta as medições da evolução do desgaste. A ASTM G 99 (1995) recomenda uma rugosidade média $Ra \leq 0,8 \mu\text{m}$.

A rugosidade média Ra dos discos foi obtida pela média aritmética de três medições em cada corpo de prova, utilizando-se um rugosímetro portátil MITUTOYO, modelo SJ-201P, com resolução de $0,01 \mu\text{m}$.

O equipamento utilizado no ensaio de desgaste pino-sobre-disco, mostrado na Figura 3.5 (DAL COMUNI; FAGUNDES, 2004), foi projetado e construído pela CISER PARAFUSOS E PORCAS e está instalado no Laboratório de Materiais da Sociedade de Ensino Superior de Santa Catarina (SOCIESC). Neste equipamento, o disco é rotacionado em seu próprio eixo, enquanto o pino é mantido fixo.

Para a realização do ensaio, os seguintes parâmetros foram adotados:

- Carga: 20 N;
- Rotação: 600 r.p.m.;
- Distância percorrida: 2.000 m.



Figura 3.5 – Equipamento utilizado para a realização do ensaio de desgaste pino-sobre-disco (DAL COMUNI; FAGUNDES, 2004).

A distância percorrida refere-se a distância linear equivalente que o pino percorreu através da rotação do disco em seu próprio eixo. As medições de perda de massa foram realizadas a cada 200 m percorridos, totalizando assim dez medições para cada conjunto de pino e disco.

A quantidade de desgaste foi determinada através da medição das massas do pino e do disco antes e após a execução de cada etapa do ensaio. As medições de massa foram realizadas através de uma balança analítica SARTORIUS, com resolução de 0,0001 g.

O procedimento experimental adotado para a realização do ensaio é descrito a seguir:

1. O pino e o disco foram limpos com álcool etílico 92,8° para a retirada de resíduos oleosos e outras impurezas contidas sobre as superfícies;
2. O pino e o disco foram pesados em uma balança analítica para determinação de suas massas iniciais;
3. O pino e o disco foram fixados no equipamento para a realização do ensaio de desgaste;
4. A cada 200 m percorridos, o pino e o disco eram retirados do equipamento de medição de desgaste;
5. O pino e o disco, após passarem por um novo processo de limpeza com álcool etílico 92,8° para a retirada dos fragmentos de desgaste, eram pesados na balança analítica para medição das massas;
6. O pino e o disco eram novamente fixados no equipamento para a continuação do ensaio de desgaste por um percurso de 200 m.
7. Esta seqüência foi repetida até totalizar os 2.000 m de percurso de desgaste.

Conforme a ASTM G 99 (1995), os resultados são mostrados pela perda volumétrica dos corpos de prova, em milímetros cúbicos. Esta conversão se faz necessária devido às

diferenças entre as densidades dos materiais. A conversão dos valores de perda de massa em perda volumétrica é dada pela Equação 3.1:

$$\text{Perda Volumétrica [mm}^3\text{]} = \frac{\text{Perda de Massa [g]}}{\text{Densidade [g/cm}^3\text{]}} \times 1.000 \quad (3.1)$$

A densidade para o aço rápido AISI M2 utilizado no cálculo da perda volumétrica foi 7,85 g/cm³, conforme informado pelo fabricante (VILLARES METALS).

3.2.8 Ensaio de Desgaste Disco de Borracha-Areia Abrasiva

As especificações deste ensaio de desgaste são apresentadas na norma ASTM G 65 (1991). Esta norma fornece um método padronizado, em nível laboratorial, para a avaliação da resistência de materiais metálicos à abrasão.

O princípio de funcionamento deste ensaio baseia-se no contato de um disco metálico revestido em sua superfície com uma borracha, de rotação específica, com um corpo de prova retangular de 25,4 mm de largura, 76,2 mm de comprimento e espessura variando entre 3 e 12,7 mm. Um fluxo de areia abrasiva, de composição e granulometria controladas, é introduzido entre as superfícies do corpo de prova e do disco. A Figura 3.6 (ASTM G65, 1991) mostra uma representação esquemática dos componentes deste ensaio.

O equipamento utilizado neste ensaio de desgaste é apresentado na Figura 3.7. O mesmo está instalado no Laboratório de Conformação Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Os corpos de prova utilizados neste ensaio de desgaste foram fabricados em aço rápido AISI M2, temperados e revenidos para obtenção de durezas dentro da faixa de 61 a 63 HRC (720 a 770 HV0,05). Estes corpos de prova foram revestidos com nitreto de titânio,

nitreto de cromo e carbonitreto de titânio através do processo P.V.D. Os revestimentos dos corpos de prova apresentam as mesmas especificações das matrizes de recorte.

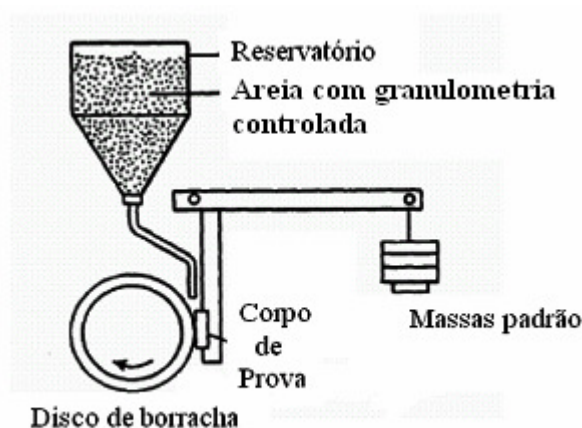


Figura 3.6 – Representação esquemática do princípio de funcionamento do ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva (ASTM G 65, 1991).

O número de corpos de prova a serem ensaiados, para uma confiabilidade de 95% dos resultados dos testes, foi obtido através da seguinte expressão (ASTM G65, 1991):

$$n = (1,96.V/e)^2 \quad (3.2)$$

onde:

n = número de corpos de prova;

V = coeficiente de variação, %;

e = erro permitido de amostras, %.

Para a realização deste trabalho, foi considerado um coeficiente de variação, ou V, de 8% e um erro permitido de amostras, ou e, de 8%, obtendo-se o número de corpos de prova, ou n, igual a 4. Assim, para cada tipo de revestimento foram preparados 4 corpos de prova, totalizando 12 corpos de prova ensaiados.

Os parâmetros utilizados para a realização dos ensaios foram:

- Tipo de abrasivo: Areia com granulação 50 (0,3 mm);
- Fluxo de areia: 350 g/minuto;

- Rotação do disco: 200 r.p.m.



Figura 3.7 – Equipamento utilizado para a realização do ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva.

A evolução do desgaste foi determinada através da diferença das massas dos corpos de prova antes e após a execução de cada etapa do ensaio. As medições de massa foram realizadas através de uma balança analítica DELTA RANGE, modelo AG204, com resolução de 0,0001 g.

O procedimento experimental adotado para a realização do ensaio é descrito a seguir:

1. Os corpos de prova foram limpos com álcool etílico 92,8° para a retirada de resíduos oleosos e outras impurezas contidas sobre as superfícies
2. Após a limpeza, os corpos de prova foram pesados em uma balança analítica para medição de suas massas iniciais;
3. Os corpos de prova foram fixados no equipamento para a realização do ensaio de desgaste;
4. Os corpos de prova foram submetidos a 30 segundos de ensaio e retirados do equipamento;
5. Os corpos de prova novamente limpos, com ultra-som, para a retirada dos fragmentos de desgaste, e pesados na balança analítica para medição da massa;

6. Os corpos de prova foram reposicionados no equipamento de medição de desgaste.

Este procedimento foi repetido por mais três vezes, cada ciclo com 30 segundos, totalizando 120 segundos de ensaio. Após os 120 segundos, os corpos de prova foram submetidos a mais 480 segundos de ensaio, sem interrupções, totalizando 600 segundos de ensaio.

Assim como para os ensaios realizados segundo a norma ASTM G 99 (1995), os resultados encontrados no ensaio de desgaste conforme a norma ASTM G 65 (1991) são descritos perda volumétrica dos corpos de prova, em milímetros cúbicos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise dos Arames

A Tabela 4.1 apresenta os resultados dos ensaios de tração e dureza que foram realizados para avaliar as propriedades mecânicas da matéria-prima durante o processo de fabricação. Os resultados encontrados, tanto para o aço SAE 1015 quanto para o aço SAE 1038, estão dentro da norma, conforme especificado na NBR NM 202 (2000), Tabela 3.3.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de tração e dureza das amostras de matéria-prima.

Propriedade Mecânica	Tipo de Aço									
	Aço SAE 1015					Aço SAE 1038				
	1ª Amostra	2ª Amostra	3ª Amostra	Média	Desvio Padrão	1ª Amostra	2ª Amostra	3ª Amostra	Média	Desvio Padrão
Limite de Resistência [MPa]	485	482	483	483,3	1,5	517	529	539	528,3	11,0
Redução de Área [%]	79	80	80	79,7	0,6	74	73	73	73,3	0,6
Dureza [HRB]	80	76	77	77,7	2,1	82	84	85	83,7	1,5

4.2 Dureza

As matrizes de recorte e os corpos de prova utilizados nos dois ensaios de desgaste em estudo neste trabalho apresentaram uma boa uniformidade na dureza do substrato, dentro da faixa especificada de 61 a 63 HRC.

As Tabelas 4.2 a 4.4 apresentam, respectivamente, as durezas dos substratos dos corpos de prova para os ensaios de desgaste disco de borracha-areia abrasiva e pino-sobre-disco e das matrizes de recorte. A dureza dos substratos dos corpos de prova e das matrizes de

recorte variou entre 61 e 63 HRC (720 e 770 HV0,05). Os discos apresentaram durezas variando entre 45 e 52 HRC (450 e 545 HV0,05).

Portanto, a pequena variação nos valores de dureza dos substratos, Tabelas 4.2 a 4.4, não deve afetar os resultados de desgaste obtidos nas escalas laboratorial e industrial.

Tabela 4.2 – Dureza do substrato dos corpos de prova utilizados no ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva.

Corpo de Prova	Revestimento	Dureza [HRC]				
		1ª Medição	2ª Medição	3ª Medição	Média	Desvio Padrão
1	Nitreto de titânio	62	63	63	62,7	0,6
2		63	63	62	62,7	0,6
3		61	62	61	61,3	0,6
4		61	62	62	61,7	0,6
5	Nitreto de cromo	63	63	62	62,7	0,6
6		63	63	62	62,7	0,6
7		63	63	62	62,7	0,6
8		63	62	62	62,3	0,6
9	Carbonitreto de titânio	63	63	63	63,0	0,0
10		63	63	63	63,0	0,0
11		63	62	62	62,3	0,6
12		63	63	63	63,0	0,0

Tabela 4.3 – Dureza do substrato dos corpos de prova utilizados no ensaio de desgaste pino-sobre-disco.

Corpo de Prova	Revestimento	Dureza dos Pinos [HRC]					Dureza dos Discos [HRC]				
		1ª Medição	2ª Medição	3ª Medição	Média	Desvio Padrão	1ª Medição	2ª Medição	3ª Medição	Média	Desvio Padrão
1	Nitreto de Titânio	61	62	61	61,3	0,6	50	49	50	49,7	0,6
2		61	61	61	61,0	0,0	45	45	45	45,0	0,0
3	Nitreto de Cromo	62	63	62	62,3	0,6	50	49	50	49,7	0,6
4		62	61	61	61,3	0,6	49	49	49	49,0	0,0
5	Carbonitreto de Titânio	62	63	62	62,3	0,6	50	52	52	51,3	1,2
6		62	62	62	62,0	0,0	50	52	50	50,7	1,2

Tabela 4.4 – Dureza do substrato das matrizes de recorte avaliadas durante o processo produtivo.

Matriz de Recorte	Revestimento	Dureza [HRC]				
		1ª Medição	2ª Medição	3ª Medição	Média	Desvio Padrão
1	Nitreto de titânio	62	61	61	61,3	0,6
2		63	62	62	62,3	0,6
3		63	63	63	63,0	0,0
4		61	61	61	61,0	0,0
5		61	61	61	61,0	0,0
6		61	61	61	61,0	0,0
7	Nitreto de cromo	62	62	62	62,0	0,0
8		61	61	61	61,0	0,0
9		62	62	62	62,0	0,0
10		61	62	61	61,3	0,6
11		62	62	62	62,0	0,0
12		63	63	63	63,0	0,0
13	Carbonitreto de titânio	62	62	62	62,0	0,0
14		62	62	62	62,0	0,0
15		61	61	61	61,0	0,0
16		62	62	62	62,0	0,0
17		62	62	62	62,0	0,0
18		63	63	63	63,0	0,0

4.3 Microdureza

A microdureza dos revestimentos foi avaliada nos corpos de prova utilizados no ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva, em regiões não submetidas ao desgaste. Este ensaio fornece um indicativo para o comportamento de desgaste dos revestimentos quando submetidos aos ensaios laboratoriais de desgaste e à aplicação industrial.

Os valores de microdureza são apresentados na forma de um histograma, Figura 4.1, com o intuito de possibilitar a avaliação da dispersão dos resultados. Os valores médios de microdureza e os respectivos desvios padrões para estes revestimentos são mostrados na Tabela 4.5.

O carbonitreto de titânio é o revestimento que apresenta o maior valor médio de microdureza, 3.164 HV0,05, dentre os três revestimentos analisados neste trabalho. Mostra-se na Figura 4.1 que as durezas dos revestimentos de nitreto de cromo e nitreto de titânio quase se sobrepõem, estando a média de microdureza do nitreto de cromo, 2.455 HV0,05, pouco acima da média de microdureza do nitreto de titânio, 2.269 HV0,05.

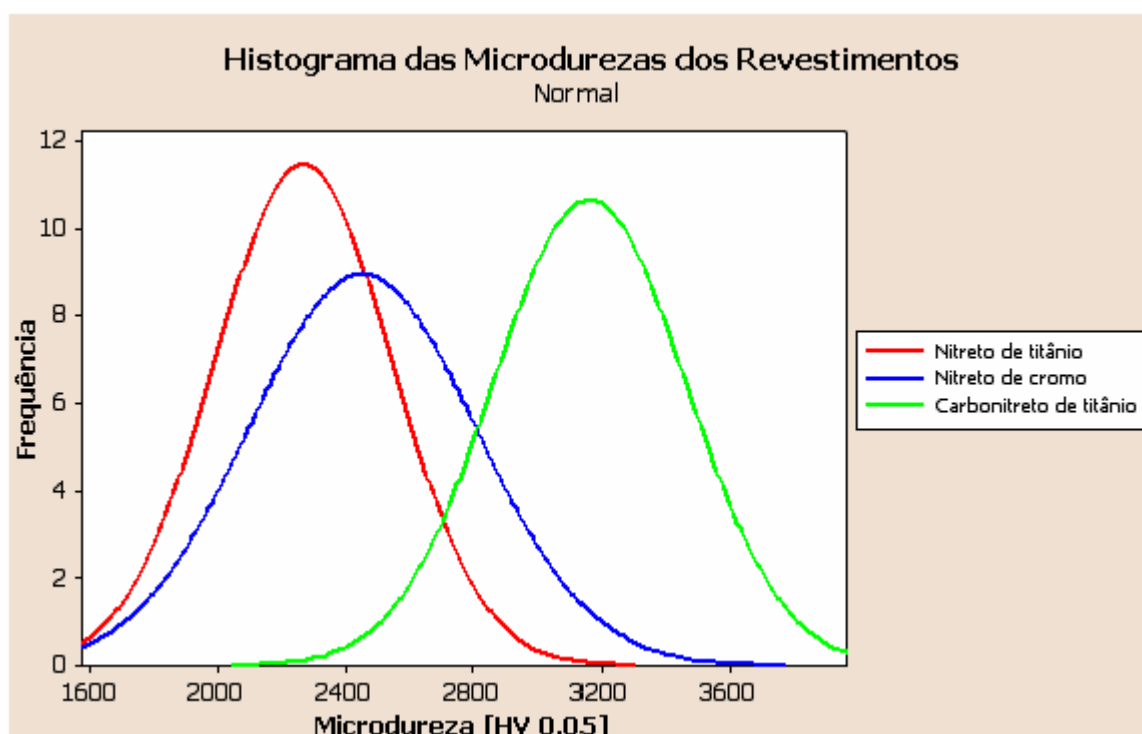


Figura 4.1 – Histograma dos valores de microdureza dos revestimentos.

O valor médio de microdureza encontrado para o carbonitreto de titânio equivale a aproximadamente 4,3 vezes a dureza encontrada nas ferramentas e corpos de prova, Tabelas 4.2 a 4.4, antes da deposição do revestimento. Para os revestimentos de nitreto de cromo e de titânio, o acréscimo de dureza devido aos revestimentos foi de 3,3 e 3,1 vezes, respectivamente.

As dispersões verificadas nos valores de microdureza medidos conferem com as dispersões dos valores apresentados na literatura [NORDIN; LARSSON; HOGMARK, 1999; SU *et al*, 1997; HEINKE *et al*, 1995; BENDER; MUMME, 2005; DUROTIN, 2004].

Tabela 4.5 – Valores médios e desvio padrão dos resultados dos ensaios de microdureza.

Revestimento	Valor Médio de Microdureza Experimental [HV0,05]	Desvio Padrão Experimental [HV0,05]
Nitreto de Titânio	2.269	279
Nitreto de Cromo	2.455	356
Carbonitreto de Titânio	3.164	300

Os revestimentos de carbonitreto de titânio, nitreto de cromo e nitreto de titânio aumentam consideravelmente a dureza das ferramentas, tornando-as mais adequadas para aplicações tribológicas [TSCHIPTSCHIN, 2004].

4.4 Adesividade de Camada

As indentações realizadas nos corpos de prova foram comparadas, através de microscopia óptica, aos padrões de falha de adesividade definidos pela escala HF. Nesta escala, apresentada na Figura 4.2, HF1 a HF4 definem boas condições de adesão, enquanto HF5 e HF6 condições de adesão insuficiente, em função da carga aplicada (HEINKE *et al*, 1995).

As Figuras 4.3 a 4.5 apresentam micrografias das indentações realizadas nos corpos de prova com os três revestimentos estudados, utilizando-se cargas progressivas de 15, 30 e 45 kgf.

Para o nitreto de titânio, não se observa a presença de trincas ou deslocamento quando são aplicadas as cargas de 15 e 30 kgf, Figuras 4.3(a) e 4.3(b). Pequenas trincas radiais surgem somente com a aplicação da carga de 45 kgf. Não se observa a presença de deslocamento de camada para nenhuma das três cargas aplicadas. A falha causada pela indentação nos corpos de prova revestidos com nitreto de titânio foi classificada como sendo HF1, para as três cargas aplicadas.

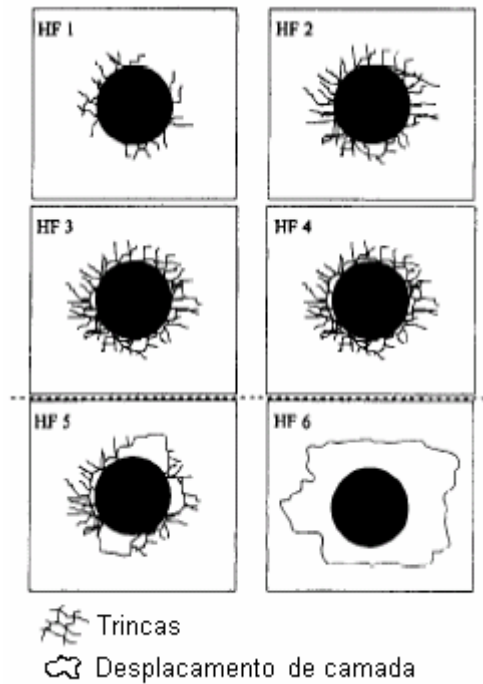


Figura 4.2 – Padrões de falha de adesividade de camada segundo a escala HF (HEINKE *et al*, 1995).

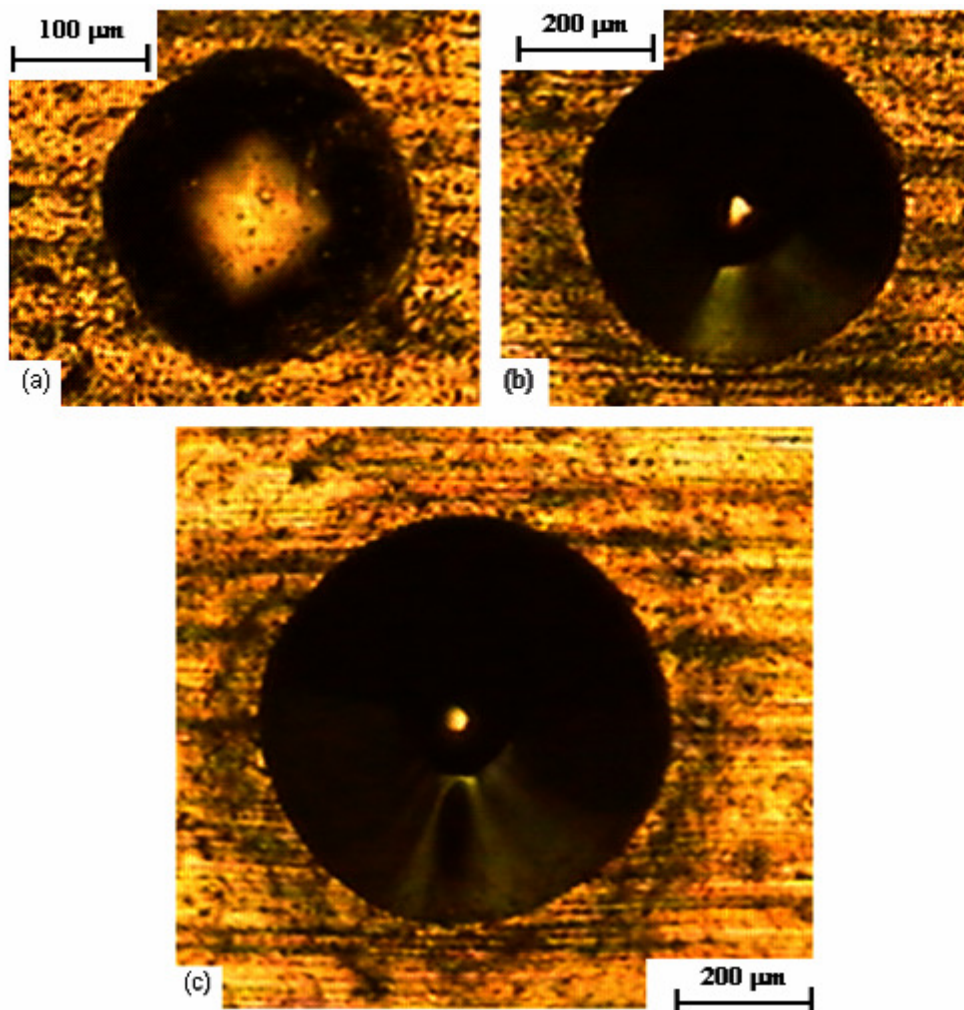


Figura 4.3 – Micrografias das indentações realizadas nos corpos de prova revestidos com nitreto de titânio: (a)15 kgf (50x), (b)30 kgf (50x) e (c)45 kgf (50x).

As indentações realizadas nos corpos de prova revestidos com nitreto de cromo provocaram falhas mais severas que as causadas no nitreto de titânio. Com a carga de 15 kgf, apenas se observam pequenas trincas na borda da indentação, conforme Figura 4.4(a). Entretanto, com a aplicação da carga de 30 kgf, surgiram trincas laterais, Figura 4.4(b), responsáveis pelo início do deslocamento da camada de revestimento. O deslocamento torna-se mais evidente com a aplicação da carga de 45 kgf, Figura 4.4(c). Assim, para o nitreto de cromo, a falha na adesividade de camada pode ser classificada como HF1, para a carga de 15 kgf, HF3 para a carga de 30 kgf e HF6 para a carga de 45 kgf.

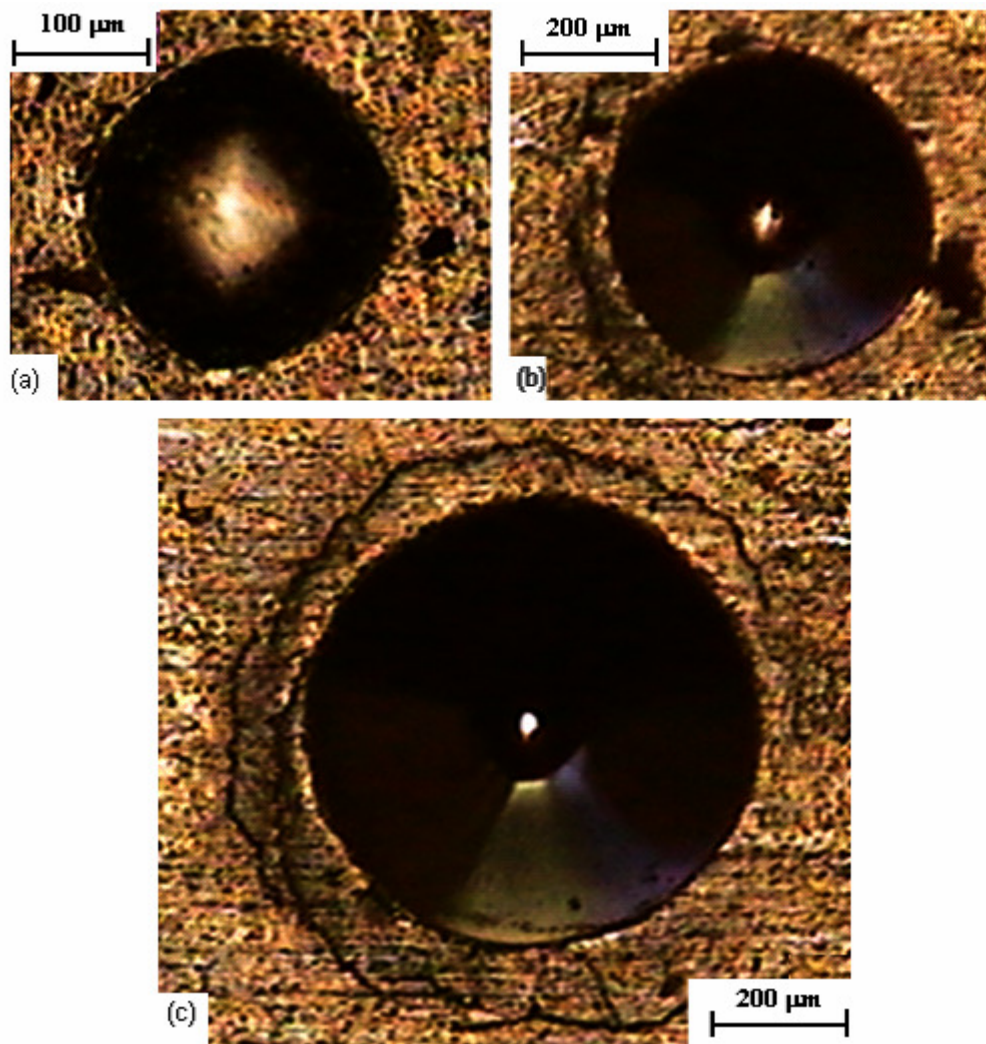


Figura 4.4 – Micrografias das indentações realizadas nos corpos de prova revestidos com nitreto de cromo: (a)15 kgf (100x), (b)30 kgf (50x) e (c)45 kgf (50x).

Para o carbonitreto de titânio, com a aplicação da carga de 15 kgf, Figura 4.5(a), não são observadas trincas significativas na borda da indentação. Com a carga de 30 kgf, são verificadas trincas radiais a partir da indentação, conforme Figura 4.5(b). Trincas radiais, laterais e alguns deslocamentos localizados são observados com a aplicação da carga de 45 kgf, conforme micrografia apresentada na Figura 4.5(c). Diante destas observações, a falha na adesividade do revestimento de carbonitreto de titânio ao substrato pode ser classificada como HF1, para a carga de 15 kgf, HF2 para a carga de 30 kgf e HF4 para a carga de 45 kgf.

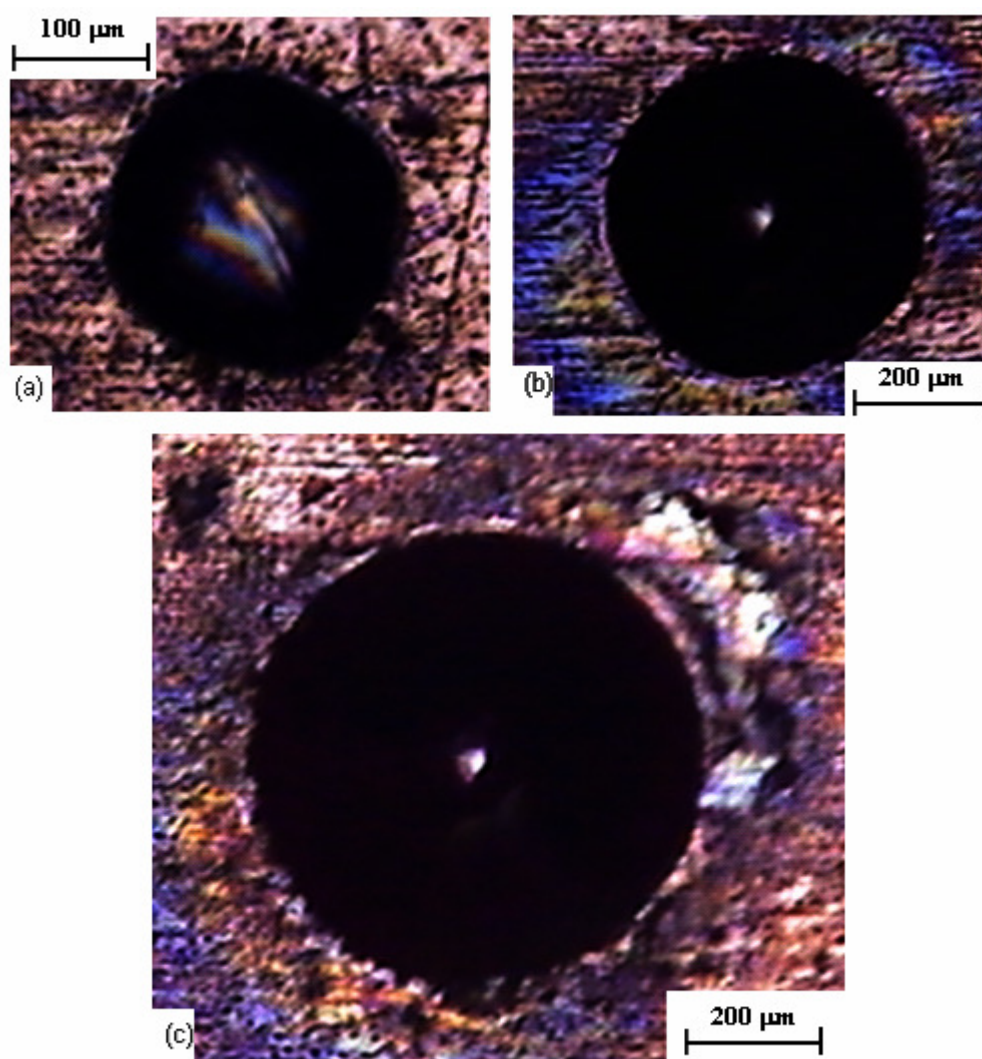


Figura 4.5 – Micrografias das indentações realizadas nos corpos de prova revestidos com carbonitreto de titânio: (a)15 kgf (100x), (b)30 kgf (50x) e (c)45 kgf (50x).

A Tabela 4.6 apresenta a classificação das falhas de adesividade de camada ao substrato dos três revestimentos como função das cargas aplicadas.

Tabela 4.6 – Classificação das falhas de adesividade de camada ao substrato em função das cargas aplicadas.

Revestimento	Carga Aplicada [kgf]		
	15	30	45
Nitreto de Titânio	HF1	HF1	HF1
Nitreto de Cromo	HF1	HF3	HF6
Carbonitreto de Titânio	HF1	HF2	HF4

O nitreto de titânio foi o revestimento que apresentou a melhor adesividade da camada ao substrato. O efeito desta propriedade na resistência ao desgaste será mostrado nas seções 4.6 a 4.8.

4.5 Caracterização Microestrutural

As Figuras 4.6 a 4.8 apresentam micrografias da camada limite das matrizes de recorte obtidas por microscopia eletrônica de varredura, mostrando os revestimentos e explicitando suas espessuras.

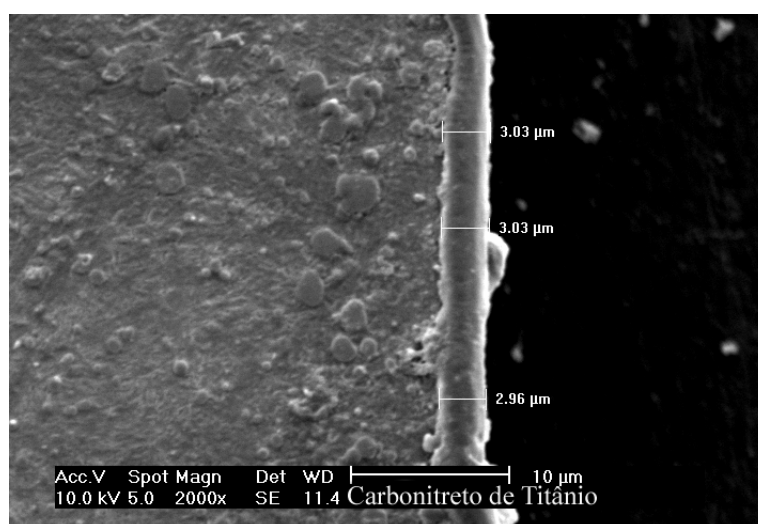


Figura 4.6 – Micrografia da camada limite da matriz de recorte com revestimento de carbonitreto de titânio.

A camada de carbonitreto de titânio apresentou a maior espessura dentre os revestimentos analisados, boa uniformidade, com a espessura variando entre 2,96 e 3,03 µm.

A camada de nitreto de cromo apresentou uma espessura entre 1,14 e 1,48 μm e uma variação levemente superior a do carbonitreto de titânio, na ordem de 0,40 μm . O nitreto de titânio apresentou uma espessura de camada entre 1,49 e 2,31 μm e uma variação considerável, de 0,82 μm . O carbonitreto de titânio apresentou uma espessura de camada média superior a duas vezes a espessura de camada média do nitreto de cromo. A espessura de camada média do nitreto de titânio, apesar da grande variação citada anteriormente, também foi superior a espessura de camada média do nitreto de cromo.

Vale salientar porém que conforme Su; Yao; Wu (1996), não é possível estabelecer uma relação direta de proporcionalidade entre a espessura de camada e a vida em serviço do revestimento. Ou seja, uma maior espessura de camada não irá proporcionar necessariamente um melhor desempenho do revestimento. O desempenho de um filme tribológico depende de um conjunto de propriedades, tais como dureza, coeficiente de atrito, tenacidade e espessura de camada.

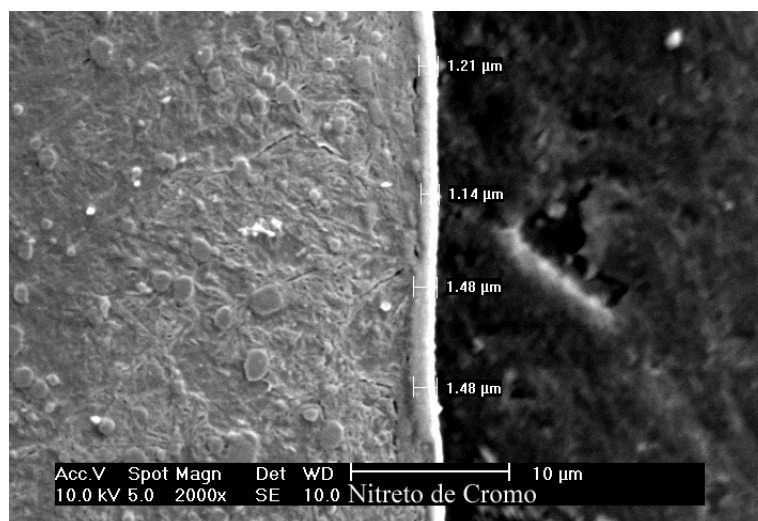


Figura 4.7 – Micrografia da camada limite da matriz de recorte com revestimento de nitreto de cromo.

As Figuras 4.9 a 4.11 apresentam micrografias do material das matrizes de recorte obtidas através de microscopia óptica, mostrando que a microestrutura temperada e revenida do aço rápido AISI M2 apresenta um alinhamento de carbonetos primários em sua matriz.

Este alinhamento de carbonetos foi verificado para as amostras de todas as matrizes de recorte analisadas. Não foi possível identificar um padrão de distribuição diferenciado entre as amostras. Por apresentar as mesmas características na microestrutura das diferentes ferramentas, o alinhamento de carbonetos não deve ter afetado o resultado do estudo comparativo entre os revestimentos.

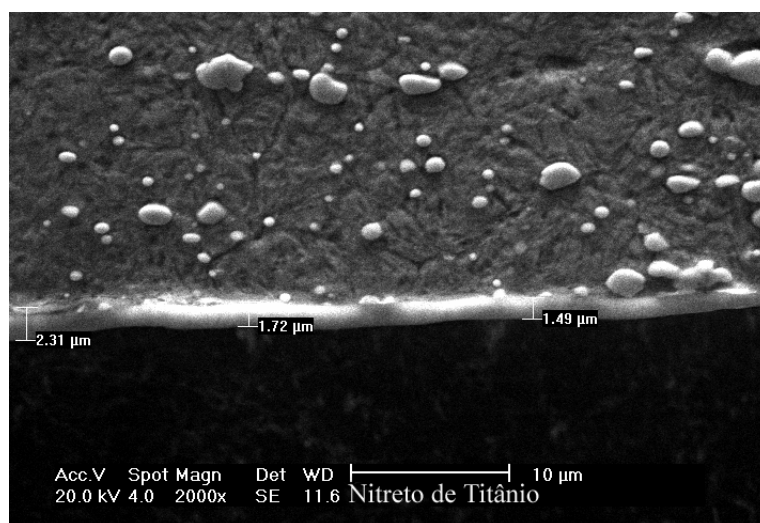


Figura 4.8 – Micrografia da camada limite da matriz de recorte com revestimento de nitreto de titânio.

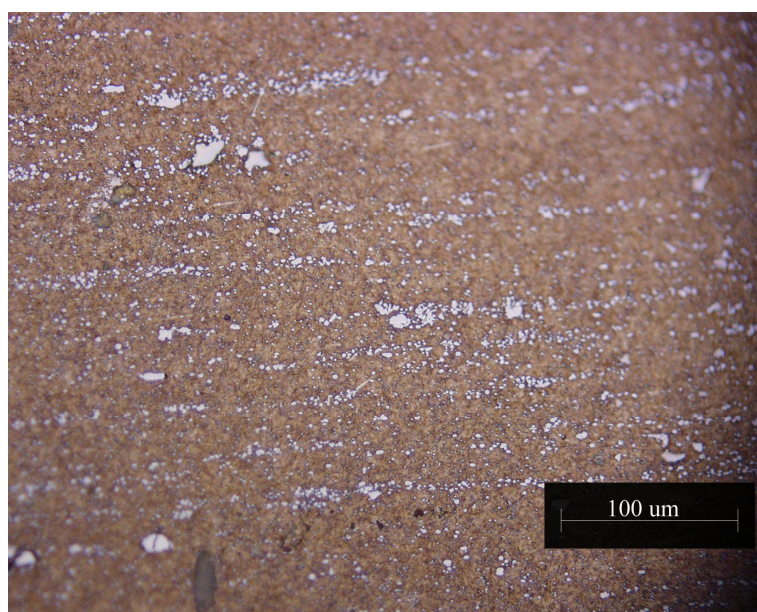


Figura 4.9 – Microestrutura temperada e revenida das matrizes de recorte revestidas com nitreto de titânio, obtida por microscopia óptica.

Os carbonetos têm um efeito grande sobre a resistência ao desgaste do aço rápido AISI M2. Sua distribuição de forma homogênea na matriz é de extrema importância para a obtenção de um aço com elevada resistência ao desgaste. Um bandeamento ou alinhamento pode promover uma forte anisotropia, podendo levar a um rendimento variável das ferramentas (MENDANHA; GOLDENSTEIN; PINEDO, 2003).

O alinhamento de carbonetos pode ser decorrente do processo de solidificação, das operações de deformação a quente, como forjamento e laminação, ou ainda devido à realização de um ciclo de tratamento térmico inadequado para este tipo de aço ferramenta. (MENDANHA; GOLDENSTEIN; PINEDO, 2003).

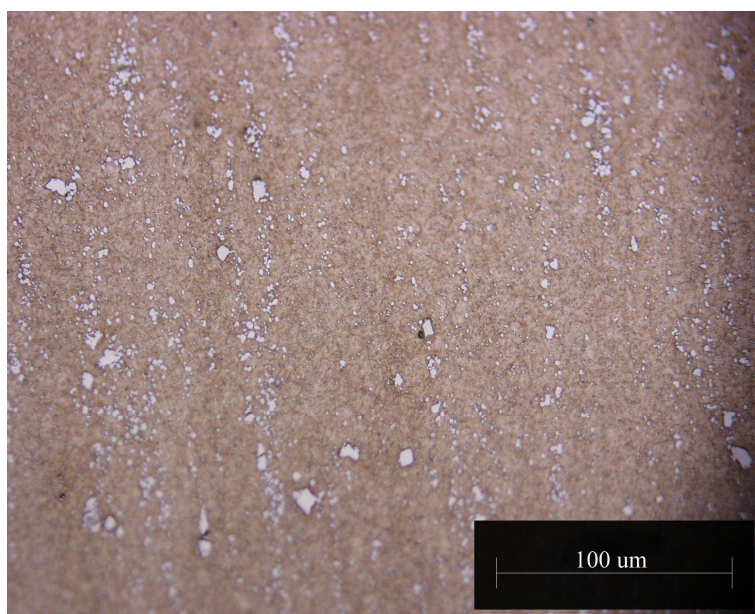


Figura 4.10 – Microestrutura temperada e revenida das matrizes de recorte revestidas com carbonitreto de titânio, obtida por microscopia óptica.

Dentre as várias causas possíveis, a solidificação parece ser a principal responsável pelo alinhamento de carbonetos na matriz do aço AISI M2. Segundo Kirk (1982 *apud* DA SILVA, 2001) e Hoyle (1988 *apud* DA SILVA, 2001), mesmo com deformações a quente da ordem de 90%, com o objetivo de quebrar a estrutura bruta de fundição e obter uma distribuição mais homogênea dos carbonetos primários durante o processo de fabricação do

aço, os carbonetos do aço AISI M2 ainda se apresentavam alinhados, conforme pode ser observado na Figura 4.12 e 4.13.

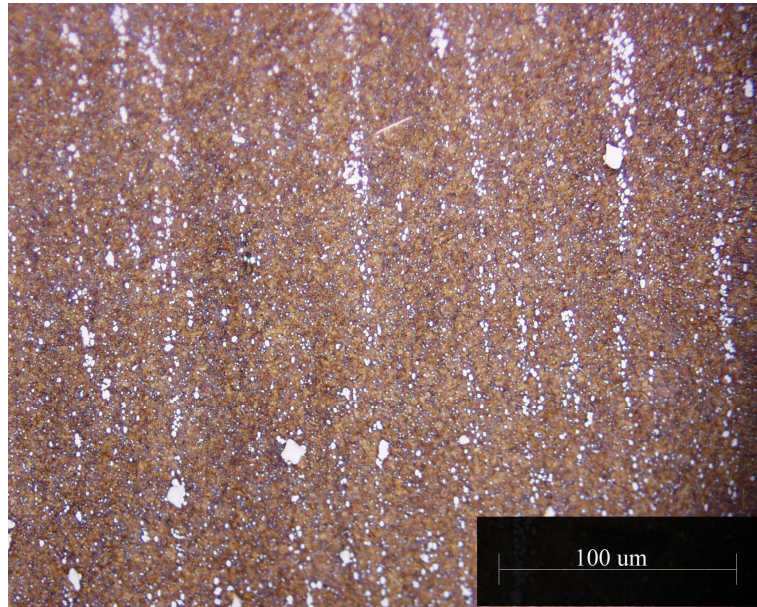


Figura 4.11 – Microestrutura temperada e revenida das matrizes de recorte revestidas com nitreto de cromo, obtida por microscopia óptica.

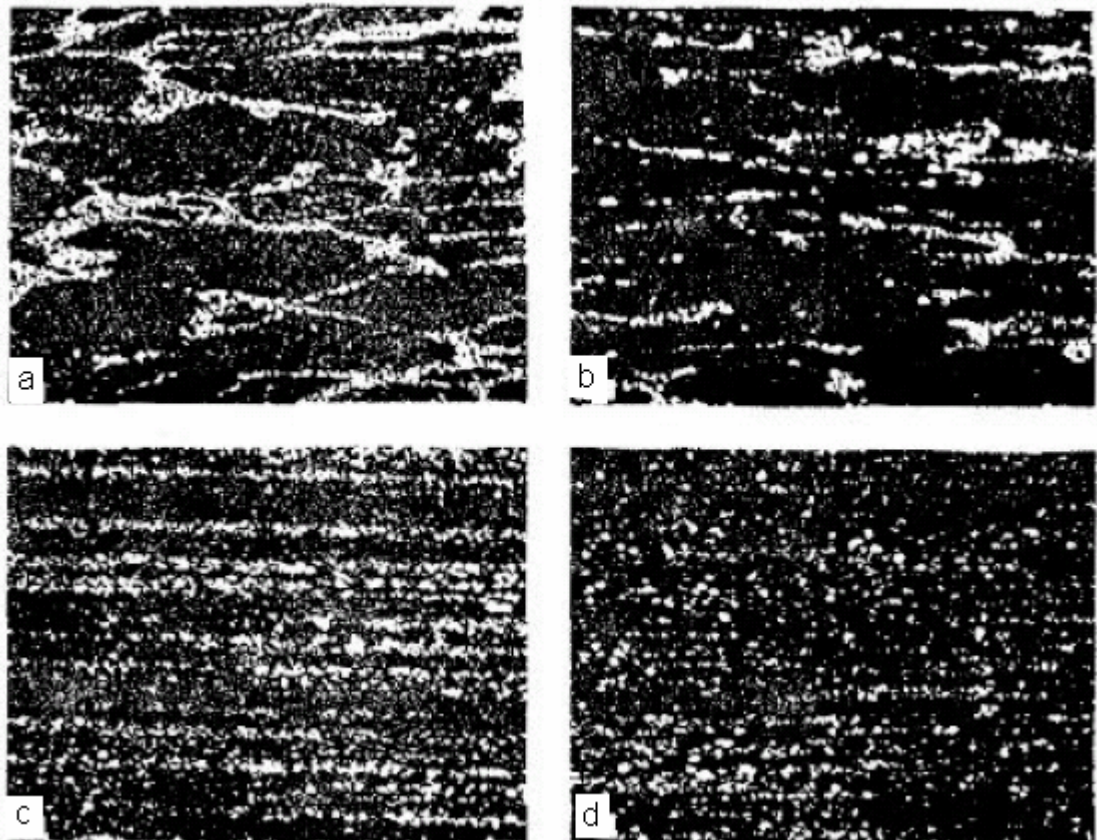


Figura 4.12 – Alinhamento dos carbonetos primários para diferentes graus de deformação (crescentes de “a” para “d”) do aço AISI M2 (HOYLE, 1988 *apud* DA SILVA, 2001).

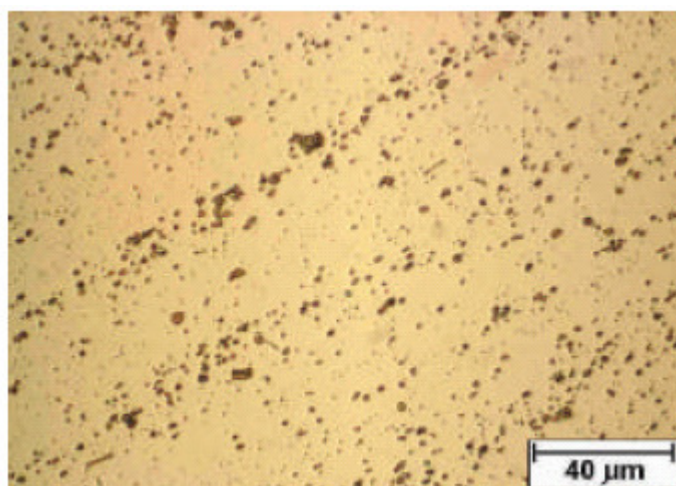


Figura 4.13 - Distribuição dos carbonetos primários na matriz do aço AISI M2 (DA SILVA, 2001).

4.6 Ensaio de Desgaste Pino-sobre-Disco

A Tabela 4.7 mostra os valores de rugosidade média, Ra, para a superfície dos discos após o processo de fabricação. Todos os valores medidos estão abaixo de 0,6 μm , estando de acordo com a norma ASTM G 99 (1995) (que recomenda um valor de no máximo 0,8 μm para a superfície dos discos).

Tabela 4.7 – Valores de rugosidade obtidos após o processo de fabricação dos discos.

Número do Disco	Rugosidade, Ra [μm]				
	1ª Medição	2ª Medição	3ª Medição	Média	Desvio Padrão
1	0,46	0,44	0,39	0,43	0,04
2	0,51	0,53	0,55	0,53	0,02
3	0,25	0,29	0,27	0,27	0,02
4	0,44	0,48	0,37	0,43	0,06
5	0,37	0,43	0,46	0,42	0,05
6	0,29	0,35	0,27	0,30	0,04

Através da realização do ensaio de desgaste pino-sobre-disco foi possível classificar os três revestimentos analisados neste trabalho com relação às resistências ao desgaste, em

função da perda volumétrica dos pinos. Os resultados são apresentados na Tabela 4.8 e na Figura 4.14.

Tabela 4.8 – Perda volumétrica média acumulada dos pinos durante a realização do ensaio de desgaste pino-sobre-disco.

Distância Percorrida [m]	Perda de Volume Média Acumulada nos Pinos Revestidos [mm ³]		
	Nitreto de Titânio	Nitreto de Cromo	Carbonitreto de Titânio
0	0,0000	0,0000	0,0000
200	0,0318	0,0064	0,0064
400	0,0573	0,0191	0,0127
600	0,1019	0,0382	0,0255
800	0,1210	0,0637	0,0510
1.000	0,2102	0,0764	0,0510
1.200	0,2866	0,1019	0,0637
1.400	0,3503	0,1083	0,0828
1.600	0,3949	0,1210	0,0955
1.800	0,4522	0,1338	0,1019
2.000	0,5032	0,1465	0,1083

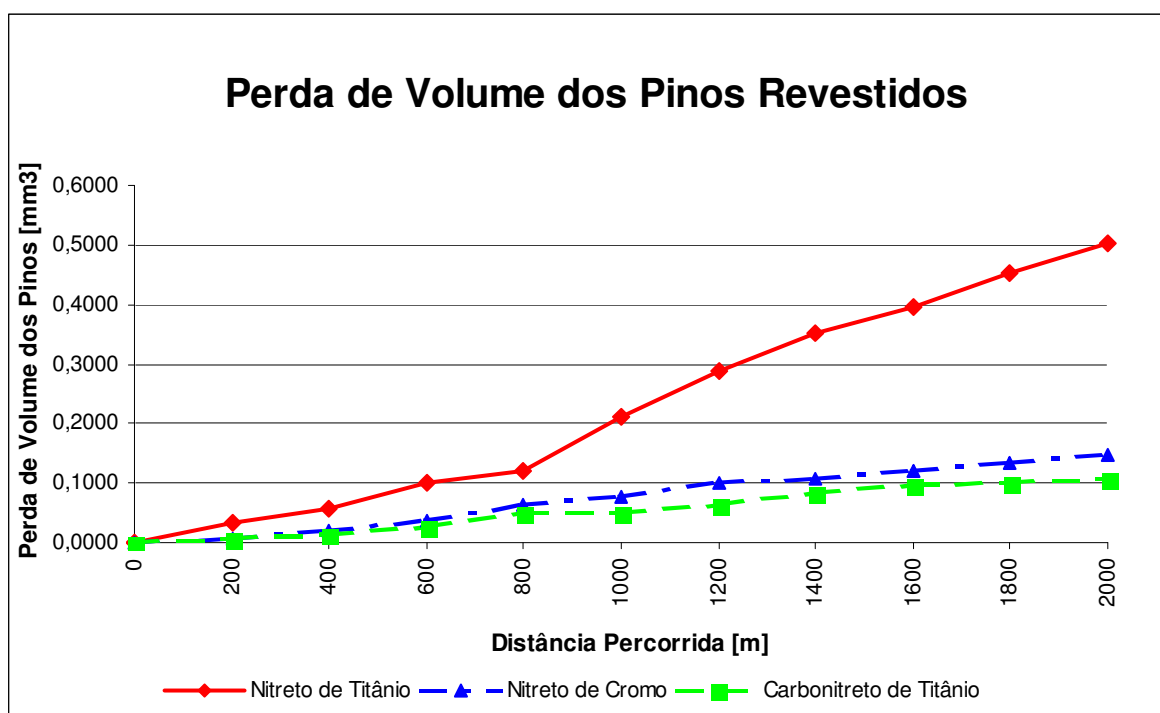


Figura 4.14 – Evolução da perda volumétrica dos pinos durante o ensaio de desgaste pino-sobre-disco.

Comparando-se os resultados apresentados na Tabela 4.8, pode-se verificar que os pinos revestidos com carbonitreto de titânio tiveram uma perda volumétrica total 3,6 vezes

menor que a perda volumétrica total do nitreto de titânio e 35% menor que a perda total do nitreto de cromo. Estas diferenças podem estar associadas à combinação do baixo coeficiente de atrito, conforme Tabela 2.8, com a alta dureza superficial do carbonitreto de titânio que, conforme apresentado na Figura 4.1 e na Tabela 4.5, encontra-se em torno de 30% superior a dureza dos outros dois revestimentos. Além disso, as micrografias apresentadas na seção 4.5 deste capítulo, Figuras 4.6 a 4.8, mostraram que a espessura de camada deste revestimento foi consideravelmente superior a dos outros dois revestimentos.

Apesar do revestimento de nitreto de titânio apresentar uma espessura de camada média maior que a do nitreto de cromo, Figuras 4.7 e 4.8, a perda de volume dos pinos revestidos com nitreto de cromo foi 2,4 vezes menor que a perda de volume dos pinos revestidos com nitreto de titânio. Este desempenho superior do nitreto de cromo pode estar associado a maior dureza superficial, Figura 4.1 e Tabela 4.5, e menor coeficiente de atrito, Tabela 2.8, encontrados neste revestimento.

Acredita-se que a adesividade de camada ao substrato não teve influência significativa nos resultados obtidos neste ensaio de desgaste. Cálculos realizados (apresentados no Apêndice A) mostraram que a tensão média que os pinos foram submetidos durante o ensaio de desgaste foi de 6,3 MPa, valor bem menor do que às tensões que provocaram as falhas de adesão no ensaio de adesividade, com médias de 3.592, 1.636 e 1.278 MPa, para as cargas de 15, 30 e 45 kgf, respectivamente.

Esta hipótese é reforçada pelo fato de não terem sido observados deslocamentos das camadas de revestimentos aplicadas nos pinos. Além disso, o nitreto de titânio, que apresentou maior aderência de camada para as maiores cargas aplicadas no ensaio, Tabela 4.6, teve desempenho inferior aos outros revestimentos neste ensaio de desgaste, apresentando as maiores taxas de desgaste.

Su; Yao (1997) encontraram resultados semelhantes, mostrando que o nitreto de cromo, apesar da menor aderência quando comparado ao nitreto de titânio no ensaio de riscamento, apresentou desempenho superior na ordem de 50% no ensaio de desgaste pino-sobre-placa. Os autores atribuíram o excelente desempenho do nitreto de cromo ao seu baixo coeficiente de atrito, aproximadamente 20% menor quando comparado ao coeficiente de atrito do nitreto de titânio.

A Figura 4.14 mostra também que as curvas de evolução do desgaste para os pinos revestidos com nitreto de cromo e com carbonitreto de titânio são caracterizadas por um crescimento linear em função da distância percorrida, com pequenas e quase constantes taxas de desgaste.

Diferentemente, percebe-se que a curva de desgaste do nitreto de titânio pode ser dividida em dois estágios distintos, com as seguintes características:

1º Estágio: até 800 metros percorridos, apresenta baixa taxa de desgaste; neste estágio está dominando o desgaste da camada do revestimento;

2º Estágio: a partir de 800 metros percorridos, taxa de desgaste bem mais elevada que no 1º Estágio, caracterizando o domínio do desgaste do substrato.

Para o revestimento de nitreto de titânio, devido ao crescimento acentuado da curva de perda de volume a partir de 800 metros percorridos, conclui-se que o efeito deste revestimento ocorreu apenas nos primeiros metros do ensaio.

4.7 Ensaio de Desgaste Disco de Borracha-Areia Abrasiva

O ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva teve como objetivo, além de classificar os revestimentos com relação à resistência ao desgaste, possibilitar uma comparação com os resultados obtidos no ensaio de desgaste pino-sobre-disco.

A Tabela 4.9 apresenta as perdas de volume dos corpos de prova obtidas com a realização do ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva.

Tabela 4.9 – Perda volumétrica média dos corpos de prova durante a realização do ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva.

Tempo de Ensaio [s]	Perda de Volume Média Acumulada nos Corpos de Prova Revestidos [mm ³]		
	Nitreto de Titânio	Nitreto de Cromo	Carbonitreto de Titânio
30	0,3439	0,0467	0,0339
60	1,2186	0,1231	0,0636
90	2,3397	0,2547	0,0891
120	3,8853	0,8322	0,3142
600	21,0318	16,2080	13,9150

As Figuras 4.15 e 4.16 mostram representações gráficas dos resultados apresentados na Tabela 4.9.

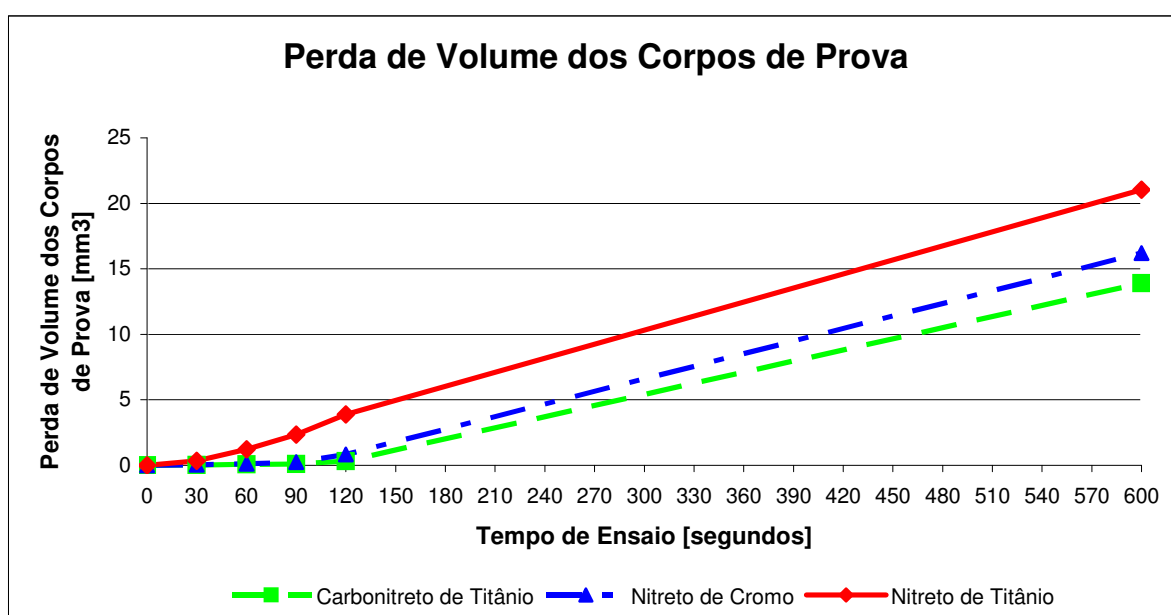


Figura 4.15 – Evolução da perda volumétrica dos corpos de prova durante o ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva.

Analisando a Figura 4.15, percebe-se que o nitreto de titânio possibilitou uma baixa taxa de desgaste até o tempo de ensaio entre 30 e 60 segundos. Já o nitreto de cromo e o carbonitreto de titânio mantêm baixo o desgaste dos corpos de prova até o tempo de ensaio

entre 90 e 120 segundos. Assim como no ensaio de desgaste analisado na seção anterior, a transição entre o desgaste da camada de revestimento e o desgaste do substrato foi presumida através da alteração da taxa de desgaste e, conseqüentemente, da modificação na inclinação das curvas de desgaste das Figuras 4.15 e 4.16.

Os corpos de prova revestidos com o nitreto de titânio, assim como no ensaio de desgaste pino-sobre-disco, apresentaram os maiores desgastes. Em apenas 30 segundos de ensaio, estes apresentaram perdas volumétricas equivalentes àsquelas encontradas somente após 90 segundos de ensaio para os corpos de prova revestidos com nitreto de cromo e 120 segundos para os corpos de prova revestidos com carbonitreto de titânio.

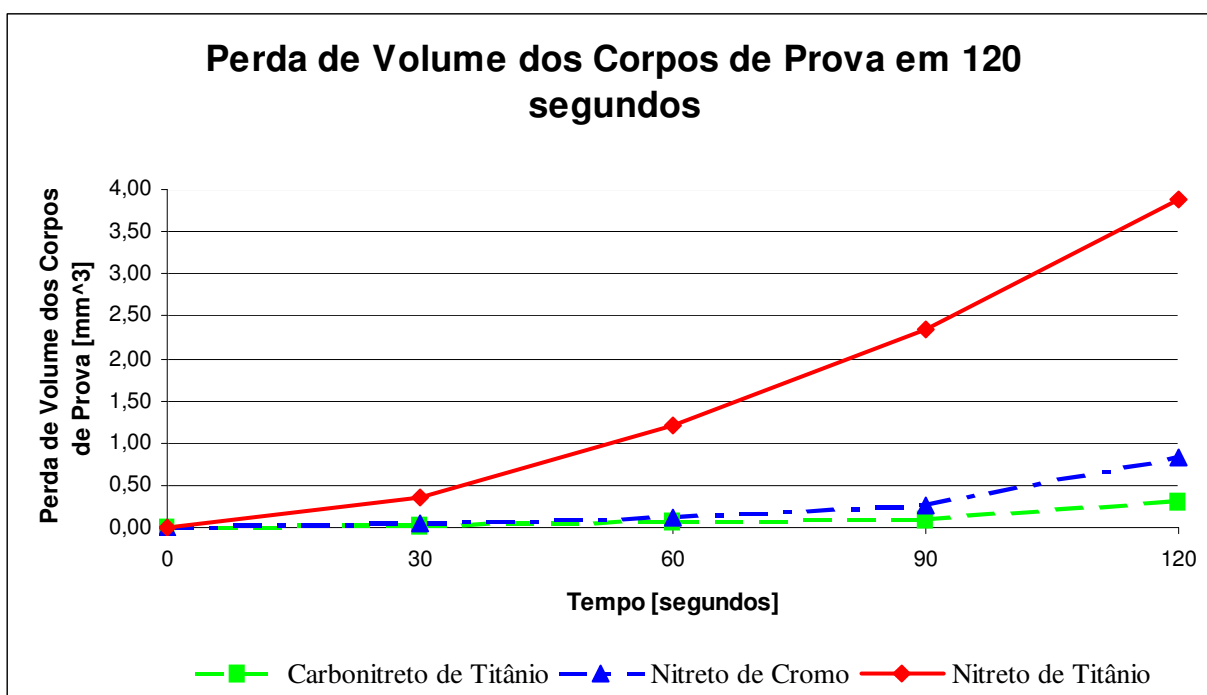


Figura 4.16 – Evolução da perda volumétrica dos corpos de prova em 120 segundos do ensaio.

O carbonitreto de titânio foi o revestimento que possibilitou a menor perda volumétrica dentre os três analisados. Percentualmente as perdas proporcionadas por este revestimento foram de 16% e 51% menores quando comparadas com as perdas do nitreto de cromo e nitreto de titânio, respectivamente. Na comparação entre o nitreto de cromo e o de titânio, o primeiro apresentou uma perda volumétrica 30% menor que o segundo.

Assim, comparando os resultados obtidos nos ensaios de desgaste pino-sobre-disco e disco de borracha-areia abrasiva, observa-se que os três revestimentos analisados tiveram, qualitativamente, comportamentos similares em ambos os ensaios, sendo classificados, com relação à perda volumétrica dos corpos de prova, na mesma ordem. Os revestimentos de nitreto de cromo e carbonitreto de titânio apresentaram desempenhos semelhantes, ambos superiores ao desempenho do nitreto de titânio. Este comportamento, conforme mencionado na seção anterior, deve-se provavelmente à combinação das propriedades de alta dureza e baixo coeficiente de atrito encontradas nestes revestimentos.

Os resultados apresentados nos dois ensaios de desgaste realizados neste trabalho estão de acordo com os resultados encontrados por outros autores que, analisando vários revestimentos aplicados em diversos substratos, através de diferentes ensaios de desgaste, mostraram que, na grande maioria das vezes, quanto maior a dureza do revestimento, maior a resistência ao desgaste. Alguns destes resultados são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Resultados experimentais de ensaios de desgaste encontrados por diferentes autores.

Fonte	Revestimento	Microdureza	Substrato	Ensaio de Desgaste	Resultado
Bressan, Hesse e Silva Jr.(2001)	Ti(Al,N)	3.500 HV 0,05	AISI M2 e metal duro com 12%Co	Pino-sobre-disco	Performance tribológica do Ti(Al,N) foi superior a do Ti(C,N)
	Ti(C,N)	3.000 HV 0,05			
Zeghni; Hashmi (2004)	TiC	1.400 kgf/mm ²	AISI D2 e AISI D3	Pino-sobre-disco	Performance tribológica do TiC foi em média 5 vezes maior que a do TiN
	TiN	800 kgf/mm ²			
Su;Yao (1997)	CrN	2.065 HV 0,05	S45C e metal duro com 6%Co	Pino-sobre-placa	Performance tribológica do CrN foi 2 vezes maior que a do TiN
	TiN	2756 HV 0,05			
Su; Yao; Wu (1996)	CrN	2.536 HV 0,025	100Cr6 e metal duro com 6%Co	Bola-sobre-placa	Performance tribológica do CrN foi superior a do TiN, em todas as espessuras de camada analisadas
	TiN	2.392 HV 0,025			

4.8 Avaliação do Desgaste das Matrizes de Recorte

Em escala industrial, a avaliação dos revestimentos foi realizada através do acompanhamento da evolução do desgaste das matrizes de recorte, utilizadas no processo de conformação a frio de parafusos sextavados.

As matrizes de recorte, em função do seu processo de fabricação, apresentaram dimensões iniciais diferentes entre si, impossibilitando a comparação direta dos resultados de cada ferramenta. Desta forma, para facilitar a análise dos resultados, foram consideradas somente as variações dimensionais das ferramentas ocorridas durante o processo devido ao desgaste, permitindo a construção das curvas de desgaste a partir de um mesmo ponto de partida.

A representação gráfica da evolução do desgaste das matrizes de corte possibilita, através da utilização de linhas de tendência, definir as taxas de desgaste dos revestimentos e do substrato. Estas taxas de desgaste serão apresentadas em milímetros por 1.000 peças produzidas, unidade de medida utilizada neste acompanhamento.

4.8.1 Desgaste das Matrizes de Recorte na Conformação do Aço SAE 1015

A Tabela 4.11 e as Figuras 4.17 a 4.19 apresentam os resultados encontrados no acompanhamento industrial das matrizes de recorte durante o processo de conformação dos parafusos sextavados de aço SAE 1015. Para uma melhor análise, as curvas de desgaste foram subdivididas em duas regiões, visando separar o desgaste do revestimento, Figuras 4.20 a 4.22, do desgaste do substrato, Figuras 4.23 a 4.25.

Tabela 4.11 – Resultados do acompanhamento em escala industrial das matrizes de recorte para o aço SAE 1015.

Revestimento	Vida das matrizes de recorte [peças produzidas]	Vida média das matrizes de recorte [peças produzidas]	Taxa de desgaste da camada de revestimento [mm/1.000 peças produzidas]	Taxa de desgaste do substrato [mm/1.000 peças produzidas]
Nitreto de Titânio	67.000	63.333	0,0003	0,0004
	80.000			
	43.000			
Nitreto de Cromo	89.000	73.000	0,0002	0,0005
	69.000			
	61.000			
Carbonitreto de Titânio	100.000	84.333	0,0002	0,0004
	85.000			
	68.000			

A separação da curva de desgaste total em desgaste da camada de revestimento e desgaste do substrato foi realizada com base na modificação da inclinação das curvas de desgaste, Figuras 4.17 a 4.19, e nas micrografias apresentadas na seção 4.5, Figuras 4.6 a 4.8, que mostram as variações de espessura de camada encontradas nas ferramentas. As curvas foram divididas nos pontos em que a variação dimensional da ferramenta, em relação ao seu dimensional inicial, se iguala aos valores médios de espessura de camada dos revestimentos.

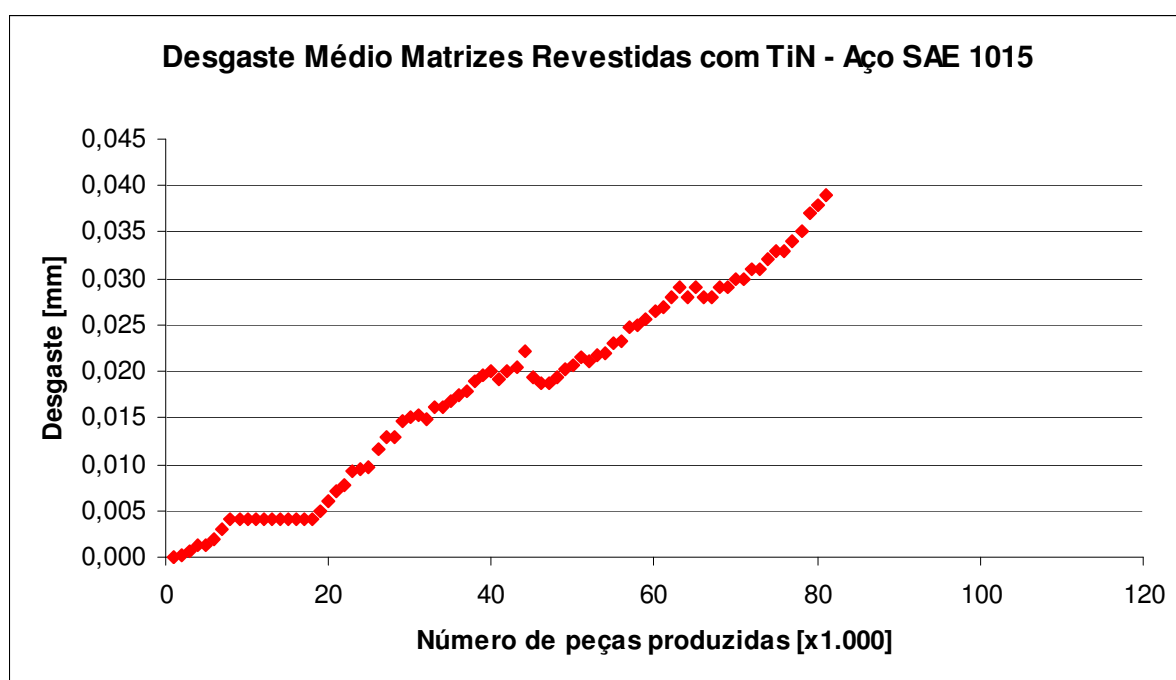


Figura 4.17 – Desgaste médio das matrizes de recorte revestidas com nitreto de titânio para o aço SAE 1015.

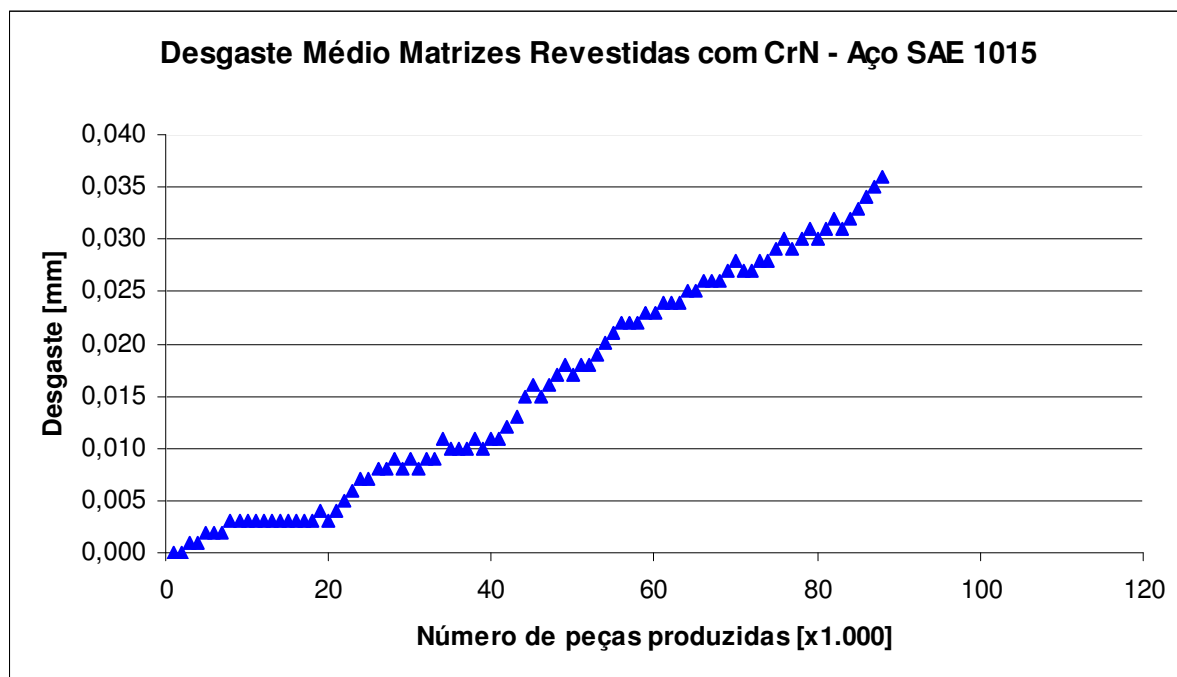


Figura 4.18 – Desgaste médio das matrizes de recorte revestidas com nitreto de cromo para o aço SAE 1015.

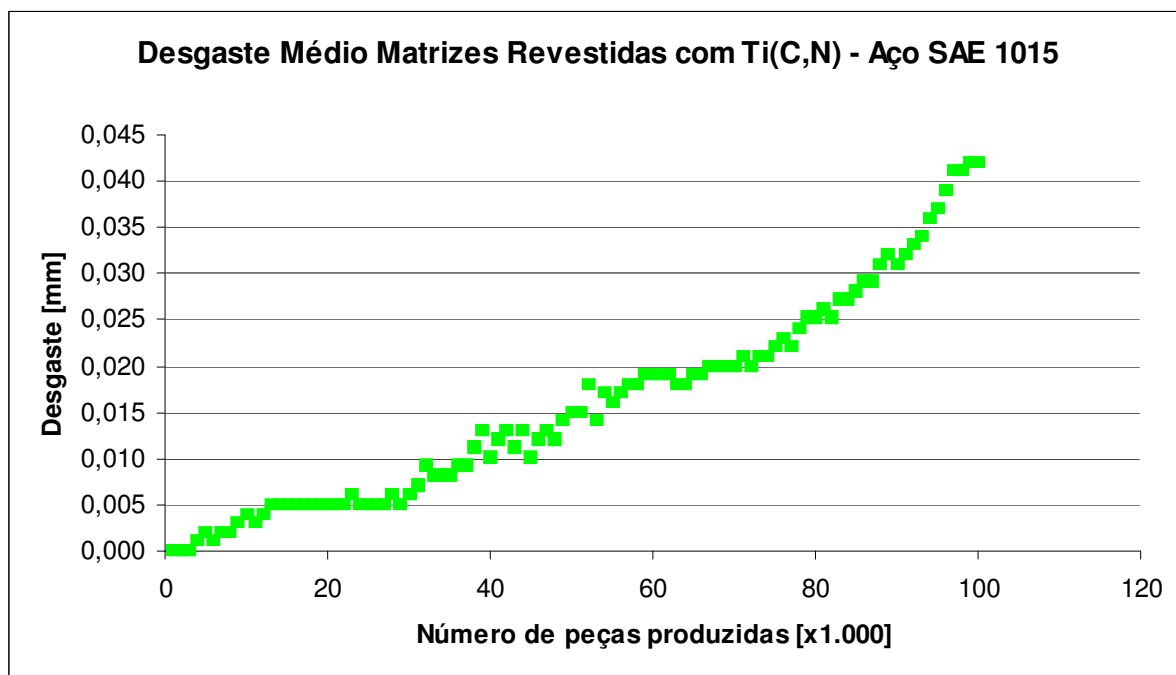


Figura 4.19 – Desgaste médio das matrizes de recorte revestidas com carbonitreto de titânio para o aço SAE 1015.

Percebe-se que as curvas de desgaste das camadas dos revestimentos, Figuras 4.20 a 4.22, apresentam inicialmente taxas de desgaste acentuadas, muito próximas às taxas de

desgaste do substrato, Figuras 4.23 a 4.25. Estas, conforme observou Suski (2004), podem estar associadas ao ajuste dimensional das ferramentas, devido às imperfeições superficiais, tendo em vista que após este ajuste ocorre uma constância nos valores encontrados.

A constância nos valores de desgaste, após o período de ajuste dimensional das ferramentas, pode estar associada ao período de desgaste das camadas dos revestimentos. Esta hipótese pode ser comprovada pelo fato de que próximo aos pontos em que a variação dimensional das ferramentas se iguala aos valores médios de espessura de camada dos revestimentos, os patamares de medidas com pequena variação dimensional têm seu fim, dando, possivelmente, início ao desgaste do substrato. Além disso, analisando as Figuras 4.17 a 4.19, percebe-se que próximo a estes pontos ocorre uma alteração brusca na inclinação das curvas de desgaste; ou seja, a mudança da taxa de desgaste da camada de revestimento para a taxa de desgaste do substrato.

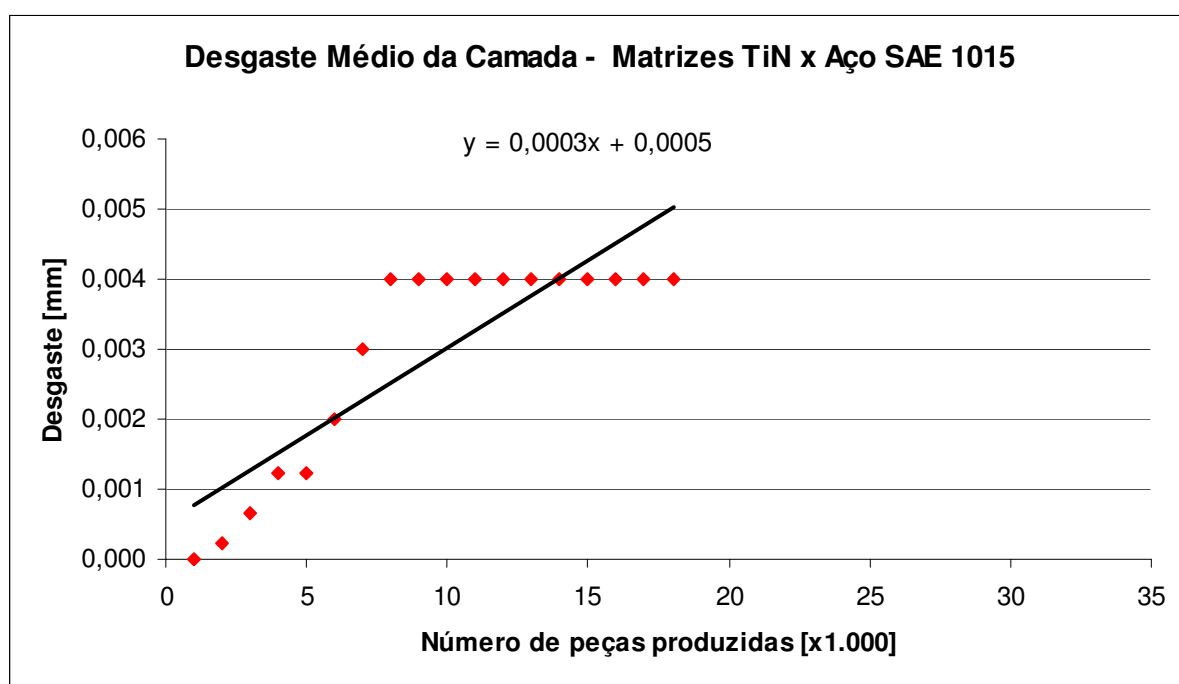


Figura 4.20 – Desgaste médio da camada de revestimento das matrizes de recorte revestidas com nitreto de titânio para o aço SAE 1015.

Desta forma, acredita-se que o tamanho dos patamares observados nas curvas de desgaste da camada, Figuras 4.20 a 4.22, está associado à resistência ao desgaste

proporcionada pelos revestimentos; quanto maior o tamanho do patamar, maior a quantidade de peças produzidas durante o desgaste da camada e, conseqüentemente, maior a resistência ao desgaste do revestimento.

As matrizes revestidas com carbonitreto de titânio produziram em média 30.000 peças durante o desgaste da camada do revestimento, Figura 4.22, apresentando o maior patamar dentre as curvas de desgaste médio da camada analisadas. Assim como nos ensaios de desgaste realizados em laboratório, este revestimento obteve a melhor performance no acompanhamento industrial para o aço SAE 1015. As matrizes revestidas com nitreto de cromo, com 21.000 peças produzidas durante o desgaste da camada de revestimento, Figura 4.21, obtiveram desempenho intermediário, inferior ao do carbonitreto de titânio e superior ao do nitreto de titânio, com 18.000 peças produzidas, Figura 4.20.

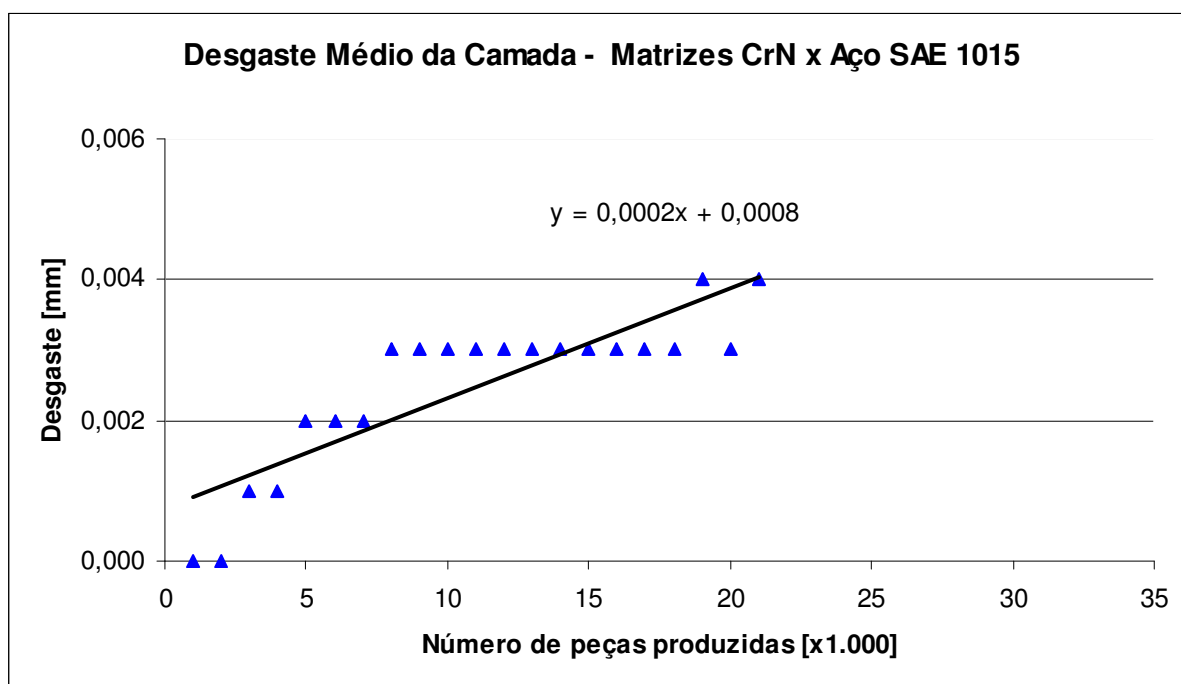


Figura 4.21 – Desgaste médio da camada de revestimento das matrizes de recorte revestidas com nitreto de cromo para o aço SAE 1015.

O desempenho dos revestimentos na conformação do aço SAE 1015, segundo a resistência ao desgaste, está de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de desgaste pino-sobre-disco e disco de borracha-areia abrasiva. Conforme discutido nas seções 4.6 e 4.7,

as menores taxas de desgaste das camadas de carbonitreto de titânio e de nitreto de cromo podem estar associadas à combinação de alta dureza superficial e baixo coeficiente de atrito encontrados nestes revestimentos.

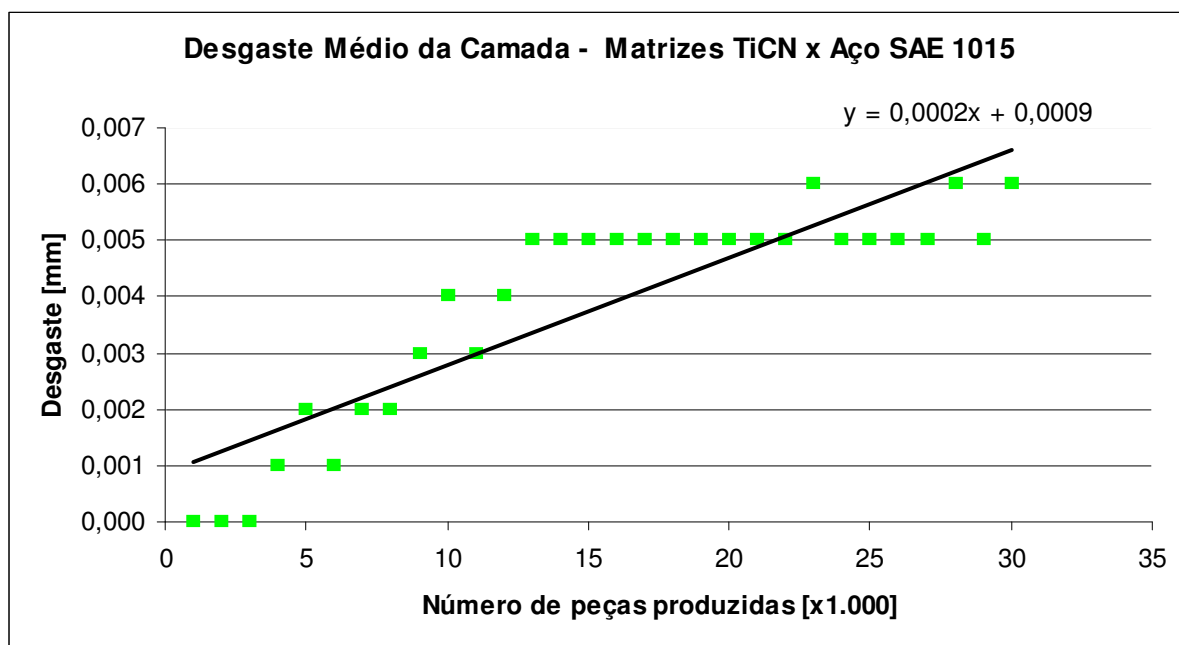


Figura 4.22 – Desgaste médio da camada de revestimento das matrizes de recorte revestidas com carbonitreto de titânio para o aço SAE 1015.

A adesividade da camada do revestimento ao substrato, assim como nos ensaios de desgaste, não teve influência também no desempenho industrial. Esta hipótese é reforçada pela não ocorrência de deslocamentos nas matrizes de recorte e pelo fato da tensão de conformação distribuída nestas ferramentas apresentar o valor médio de 712 MPa, menor que as tensões que provocaram a falha de adesividade de camada, cujos valores médios calculados foram de 3.592, 1.636 e 1.278 MPa para as cargas de 15, 30 e 45 kgf, respectivamente. O cálculo das tensões é apresentado no Apêndice A.

As Figuras 4.23 a 4.25 apresentam as curvas de desgaste do substrato das matrizes de recorte, para o aço SAE 1015. Estas figuras permitem confirmar a coerência na definição dos pontos adotados para a divisão das curvas de desgaste total, em desgaste da camada do revestimento e do substrato, tendo em vista que, para os três revestimentos, as taxas de

desgaste destas figuras são praticamente as mesmas. Além disso, a diferença no número de peças produzidas durante o desgaste do substrato para os três revestimentos foi pequena: 63.000, 67.000 e 70.000 peças, para o nitreto de titânio, nitreto de cromo e carbonitreto de titânio respectivamente. Esta diferença entre o maior e o menor número de peças produzidas corresponde a uma variação de 10%.

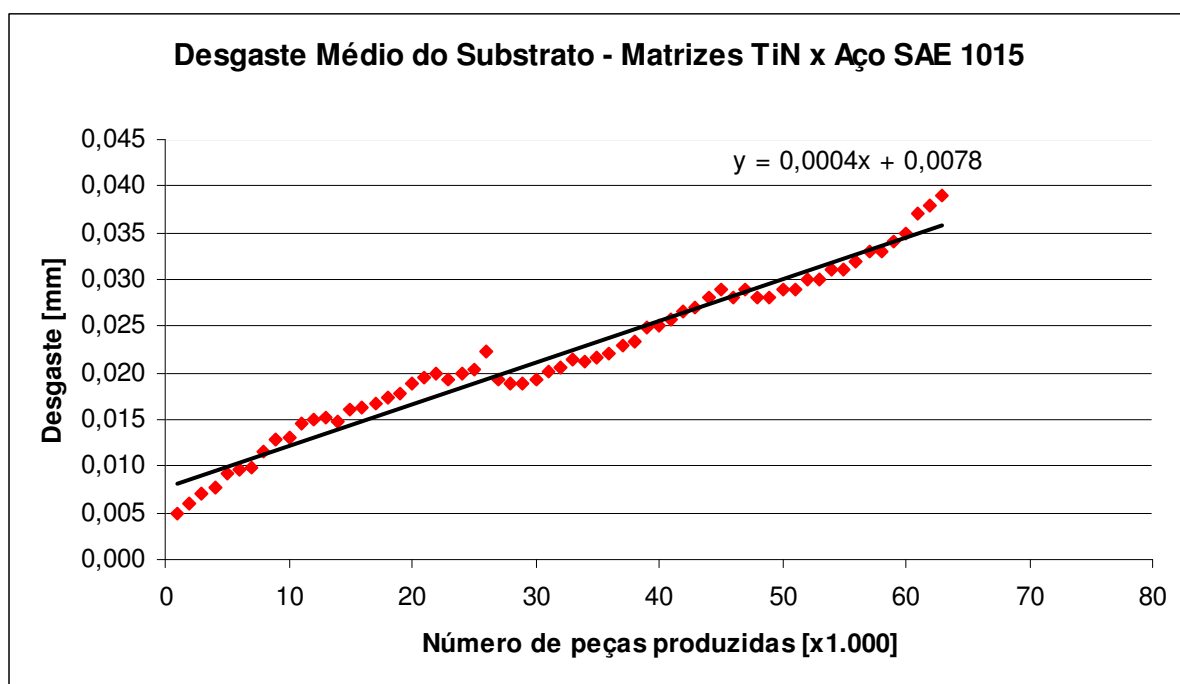


Figura 4.23 – Desgaste médio do substrato das matrizes de recorte revestidas com nitreto de titânio para o aço SAE 1015.

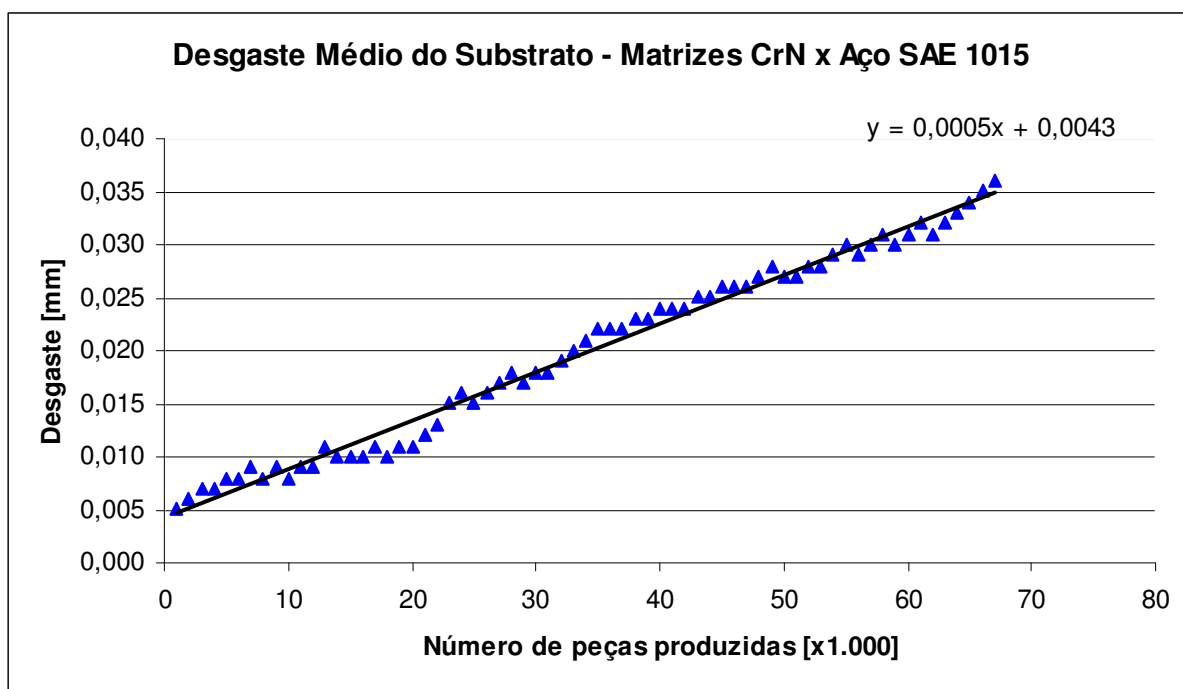


Figura 4.24 – Desgaste médio do substrato das matrizes de recorte revestidas com nitreto de cromo para o aço SAE 1015.

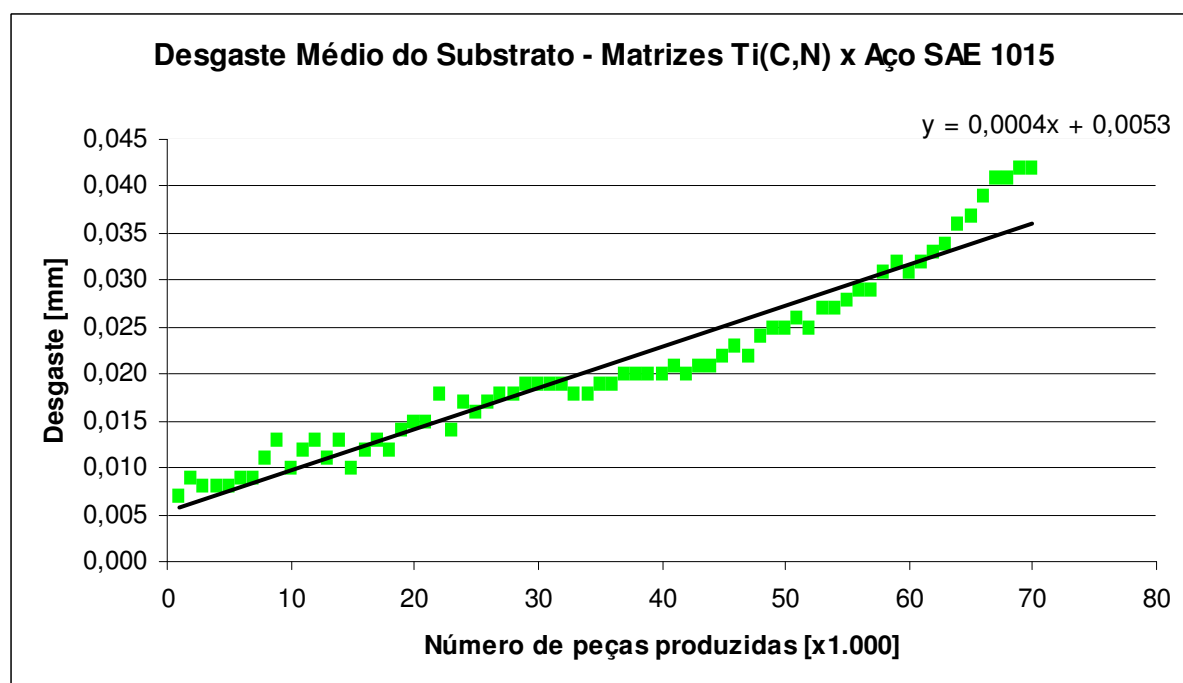


Figura 4.25 – Desgaste médio do substrato das matrizes de recorte revestidas com carbonitreto de titânio para o aço SAE 1015.

4.8.2 Desgaste das Matrizes de Recorte na Conformação do Aço SAE 1038

A Tabela 4.12 e as Figuras 4.26 a 4.28 apresentam os resultados encontrados no acompanhamento industrial das matrizes de recorte durante o processo de conformação dos parafusos sextavados de aço SAE 1038. Assim como nas análises realizadas para o aço SAE 1015 na seção anterior, as curvas de desgaste foram subdivididas em duas, uma referente somente ao desgaste da camada de revestimento, Figuras 4.29 a 4.31, e outra ao desgaste do substrato, Figuras 4.32 a 4.34.

Nas curvas de desgaste total das matrizes para o aço SAE 1038, a divisão entre o desgaste da camada de revestimento e o desgaste do substrato não é tão evidente como a encontrada para as matrizes utilizadas na conformação do aço SAE 1015. Os patamares com valores constantes, supostamente de desgaste das camadas de revestimentos, são bem menores que os encontrados nas Figuras 4.17 a 4.19, para o aço SAE 1015, sugerindo um desgaste mais acelerado destas camadas.

Tabela 4.12 – Resultados do acompanhamento em escala industrial das matrizes de recorte para o aço SAE 1038.

Revestimento	Vida das matrizes de recorte [peças produzidas]	Vida média das matrizes de recorte [peças produzidas]	Taxa de desgaste da camada de revestimento [mm/1.000 peças produzidas]	Taxa de desgaste do substrato [mm/1.000 peças produzidas]
Nitreto de Titânio	29.000	33.666	0,0005	0,0008
	34.000			
	38.000			
Nitreto de Cromo	41.000	41.333	0,0004	0,0007
	39.000			
	44.000			
Carbonitreto de Titânio	53.000	58.000	0,0003	0,0006
	70.000			
	51.000			

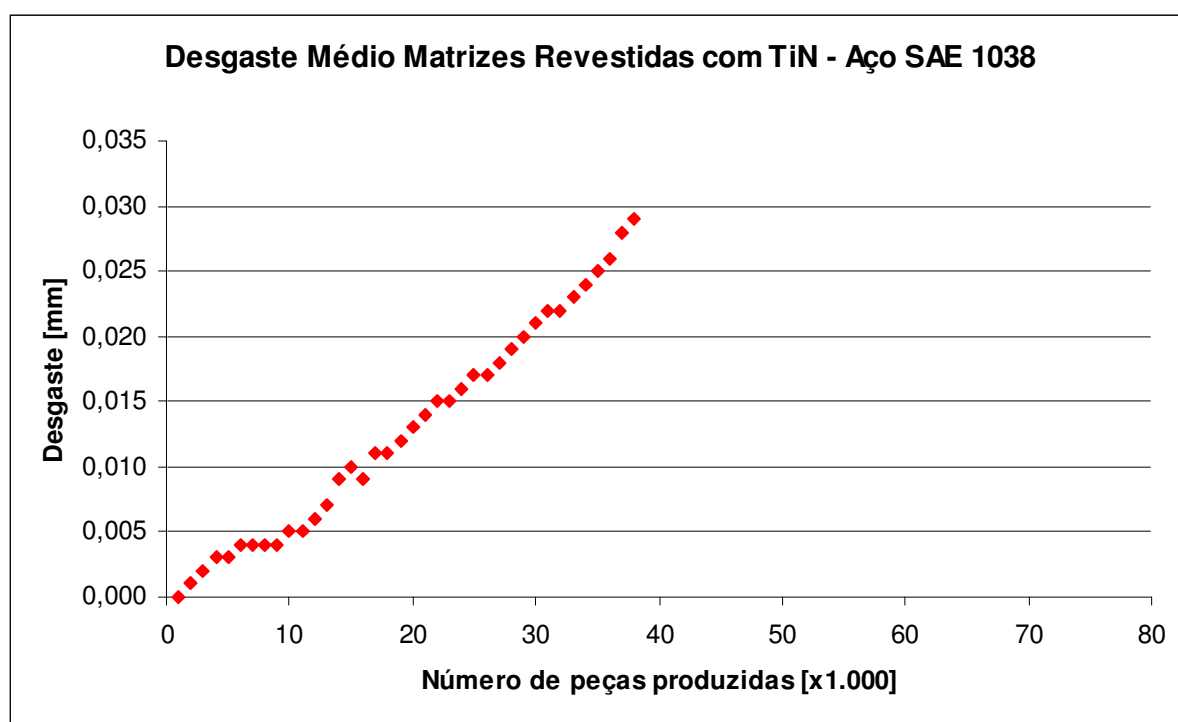


Figura 4.26 – Desgaste médio das matrizes de recorte revestidas com nitreto de titânio para o aço SAE 1038.

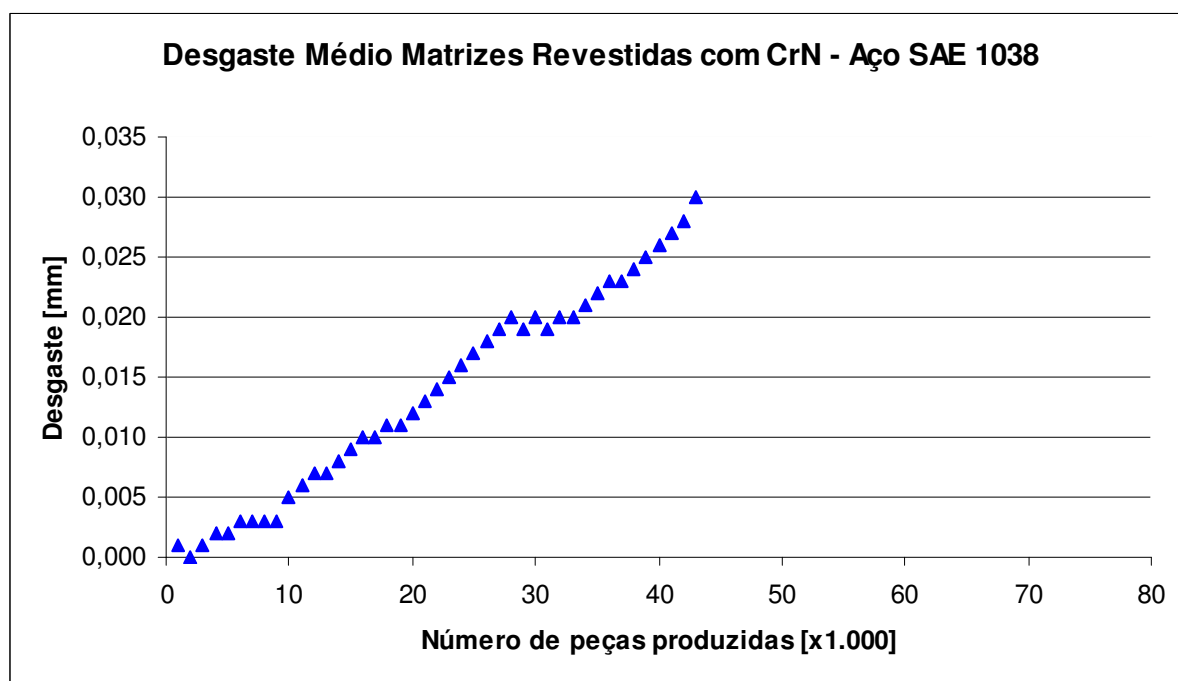


Figura 4.27 – Desgaste médio das matrizes de recorte revestidas com nitreto de cromo para o aço SAE 1038.

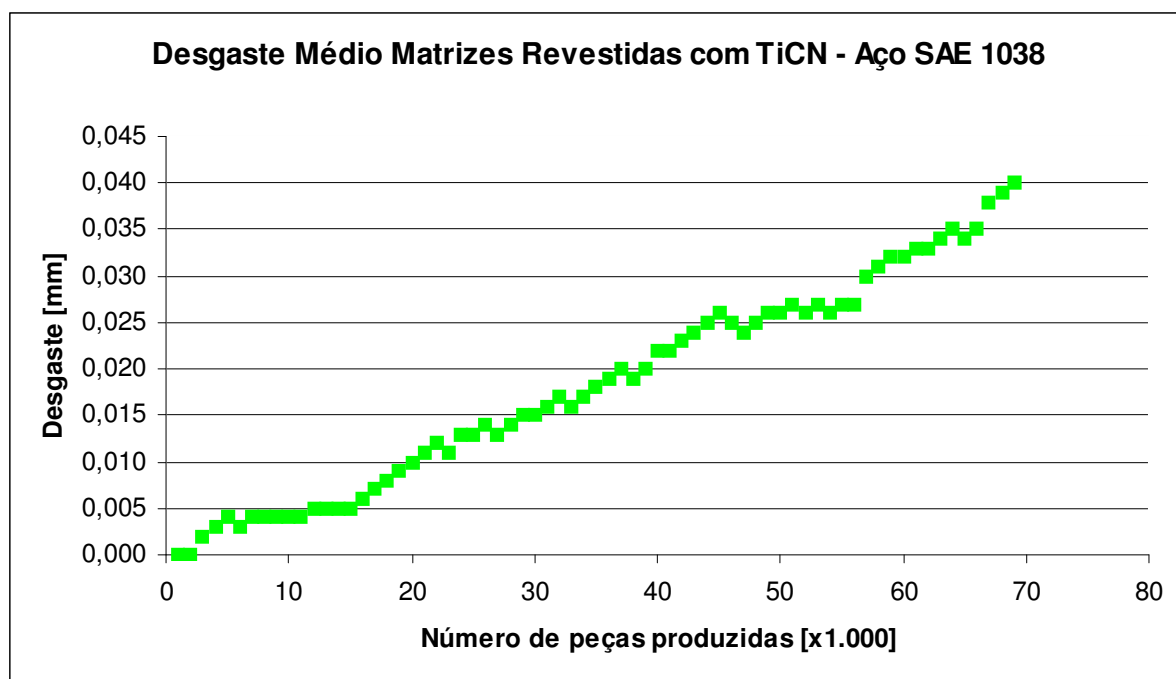


Figura 4.28 – Desgaste médio das matrizes de recorte revestidas com carbonitreto de titânio para o aço SAE 1038.

As Figuras 4.29 a 4.31 apresentam as curvas de desgaste das camadas de revestimentos. Assim como na seção anterior, estas curvas foram obtidas com base na espessura de camada dos revestimentos, apresentadas nas micrografias da seção 4.5, e na mudança de inclinação das curvas.

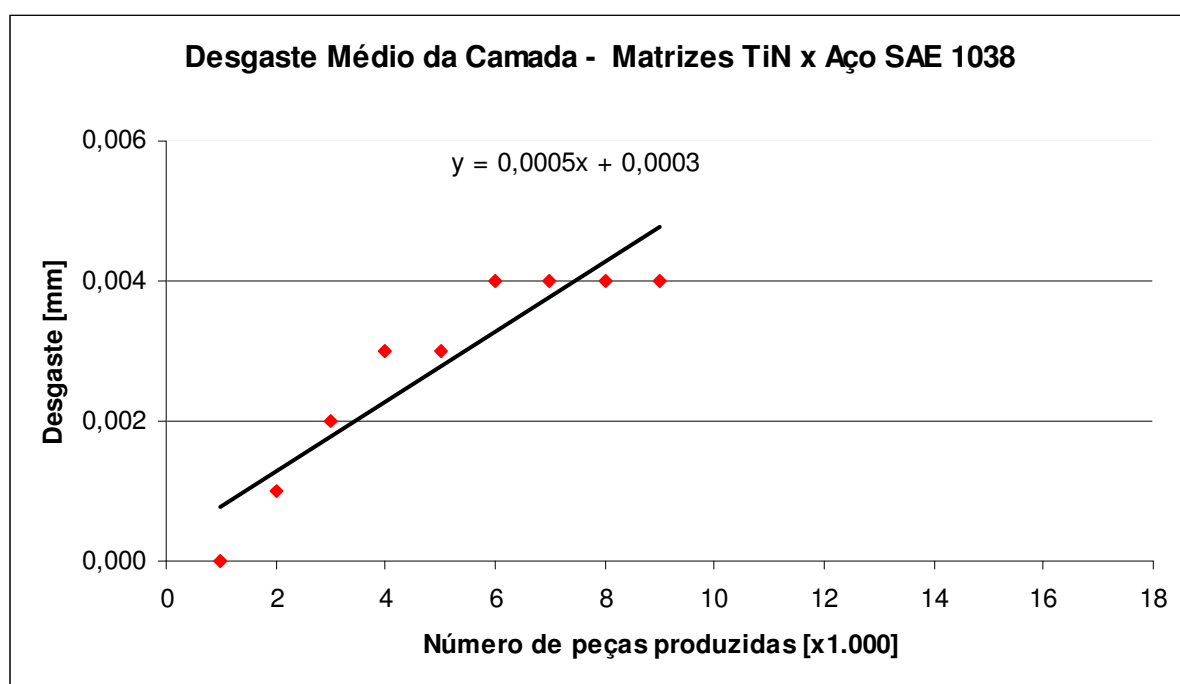


Figura 4.29 – Desgaste médio da camada de revestimento das matrizes de recorte revestidas com nitreto de titânio para o aço SAE 1038.

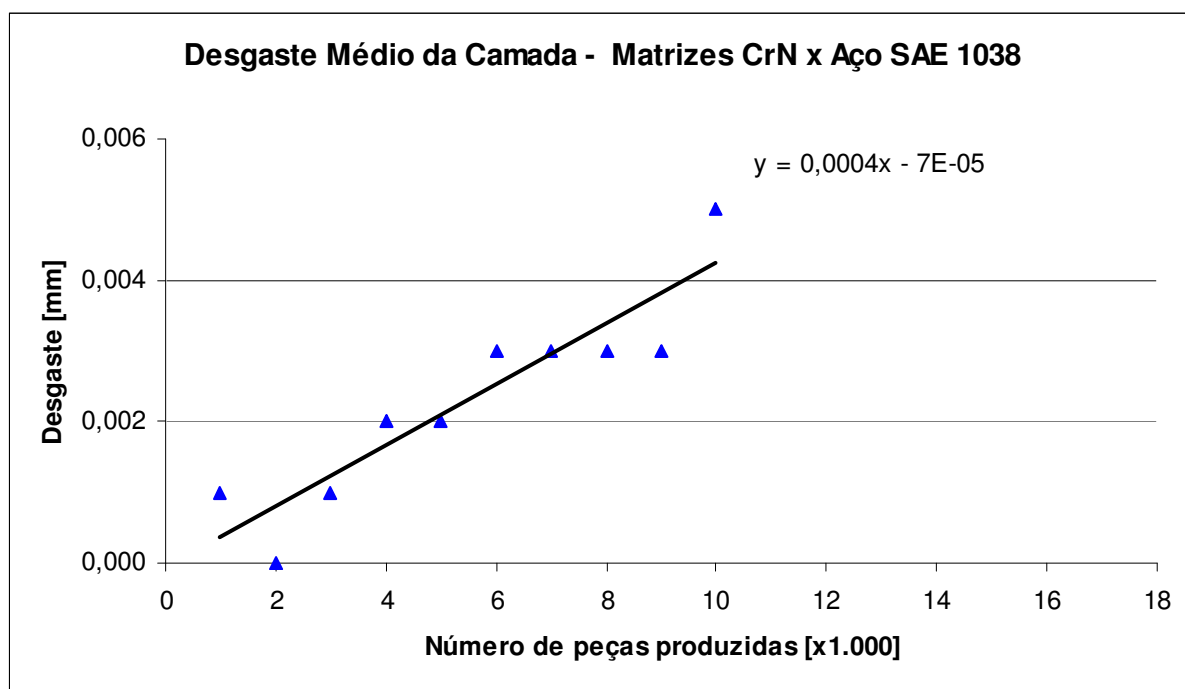


Figura 4.30 – Desgaste médio da camada de revestimento das matrizes de recorte revestidas com nitreto de cromo para o aço SAE 1038.

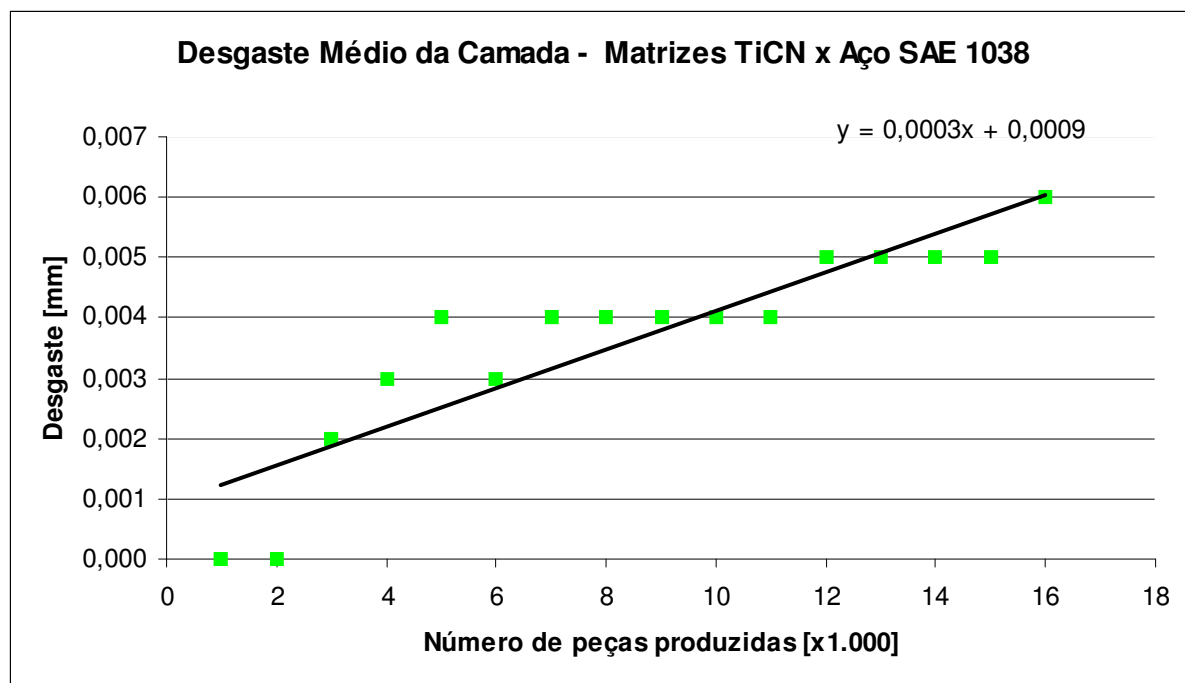


Figura 4.31 – Desgaste médio da camada de revestimento das matrizes de recorte revestidas com carbonitreto de titânio para o aço SAE 1038.

Os resultados do acompanhamento industrial das matrizes de recorte para o aço SAE 1038 foram similares aos resultados apresentados na seção 4.8.1, para o aço SAE 1015. As diferenças foram na magnitude das taxas de desgaste da camada e do substrato, maiores para o aço SAE 1038, tendo em vista que o desempenho dos revestimentos obedeceu a mesma ordem definida nos ensaios de desgaste e no acompanhamento das matrizes de recorte utilizadas na conformação do aço SAE 1015.

As Figuras 4.32 a 4.34 apresentam as curvas de desgaste do substrato das matrizes de recorte, para o aço SAE 1038.

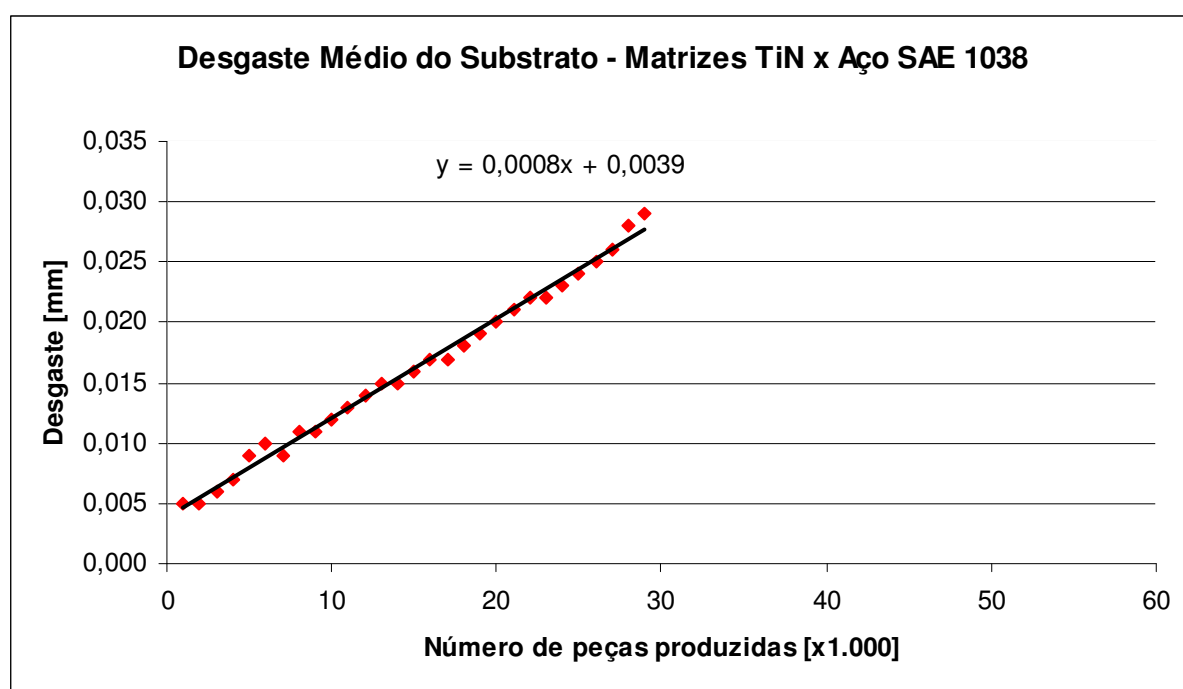


Figura 4.32 – Desgaste médio do substrato das matrizes de recorte revestidas com nitreto de titânio para o aço SAE 1038.

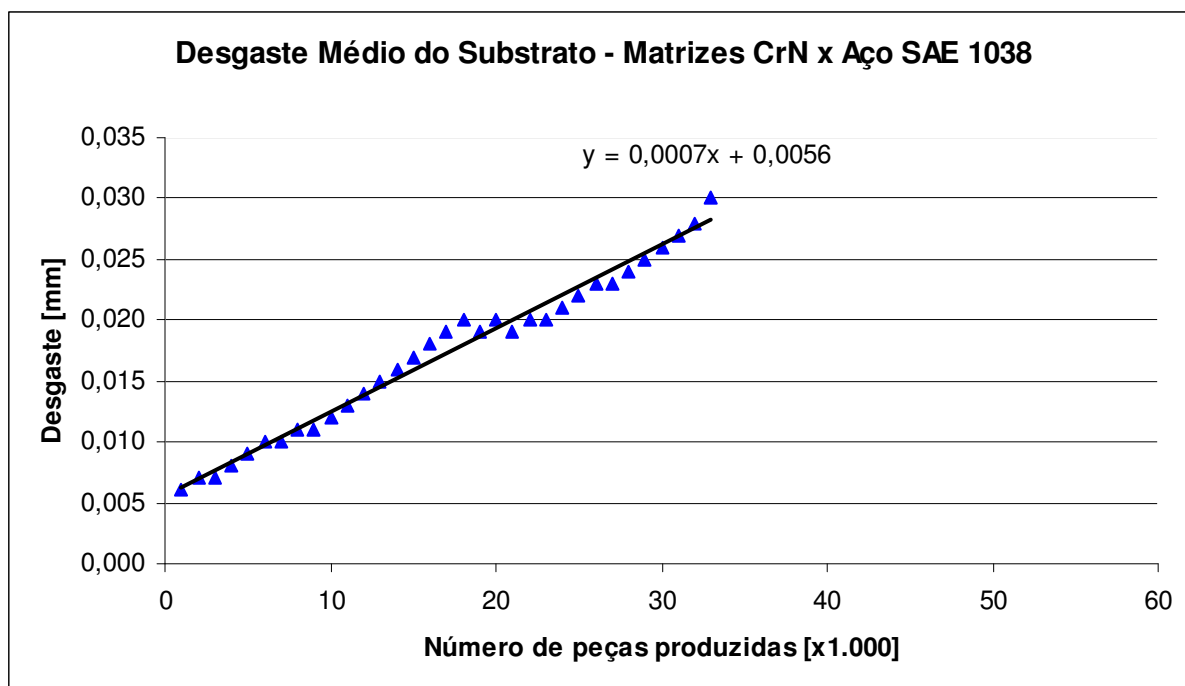


Figura 4.33 – Desgaste médio do substrato das matrizes de recorte revestidas com nitreto de cromo para o aço SAE 1038.

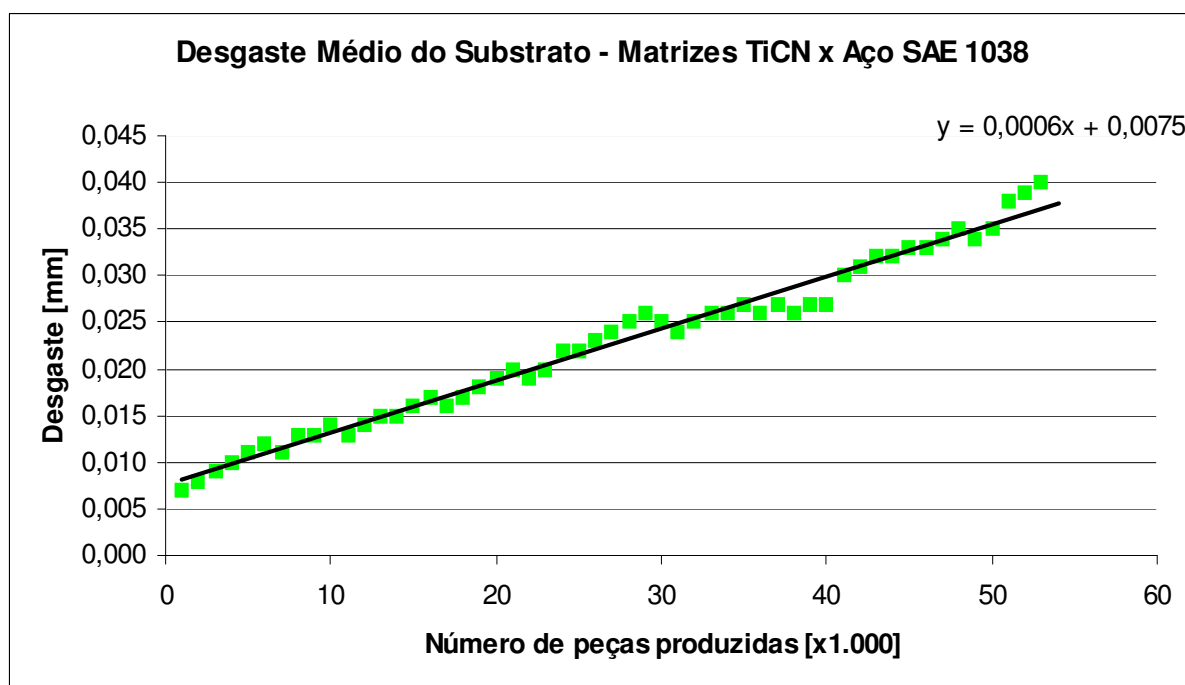


Figura 4.34 – Desgaste médio do substrato das matrizes de recorte revestidas com carbonitreto de titânio para o aço SAE 1038.

4.8.3 Comparação dos Resultados

A Tabela 4.13 apresenta um resumo dos resultados encontrados no acompanhamento em escala industrial das matrizes de recorte, apresentados como gráficos nas seções 4.8.1 e 4.8.2, para os dois tipos de aços analisados, destacando as taxas de desgaste e quantidade de peças produzidas por ferramenta.

Tabela 4.13 – Resumo dos resultados do acompanhamento em escala industrial das matrizes de recorte.

Revestimento	Matéria-prima	Vida das matrizes de recorte [peças produzidas]	Vida média das matrizes de recorte [peças produzidas]	Taxa de Desgaste da Camada de Revestimento [mm/1.000 peças produzidas]	Taxa de Desgaste do Substrato [mm/1.000 peças produzidas]
Nitreto de Titânio	SAE 1015	67.000	63.333	0,0003	0,0004
		80.000			
		43.000			
	SAE 1038	29.000	33.666	0,0005	0,0008
		34.000			
		38.000			
Nitreto de Cromo	SAE 1015	89.000	73.000	0,0002	0,0005
		69.000			
		61.000			
	SAE 1038	41.000	41.333	0,0004	0,0007
		39.000			
		44.000			
Carbonitreto de Titânio	SAE 1015	100.000	84.333	0,0002	0,0004
		85.000			
		68.000			
	SAE 1038	53.000	58.000	0,0003	0,0006
		70.000			
		51.000			

Analisando a Tabela 4.13, percebe-se que as matrizes de recorte de mesmo revestimento também apresentaram, em alguns casos, uma variação de rendimento considerável entre si, apesar de terem sido submetidas às mesmas condições de processo. Provavelmente, estas variações nos resultados são decorrentes da grande quantidade de variáveis existentes no processo de conformação mecânica a frio, não analisadas neste

trabalho. Algumas destas variáveis são: a presença de inclusões e porosidades na matéria-prima, a condição de lubrificação das ferramentas e do material, as folgas existentes no conjunto de ferramentas da prensa e os parâmetros de regulação de máquina.

Acredita-se que a regulação de máquina, dentre as variáveis citadas anteriormente, teve o maior efeito na variação da vida das matrizes de recorte. Esta hipótese se deve ao fato de que os níveis de desgaste a que são submetidas as matrizes de recorte dependem da proximidade, ou afastamento, entre o conjunto punção e matriz da prensa. A Figura 4.35 mostra uma representação esquemática da operação de recorte do sextavado, destacando o afastamento entre punção e matriz (denominado de cota L). Quanto maior a aproximação entre a matriz de recorte e a guia de recorte (menor a cota L), maior é a solicitação na primeira e, conseqüentemente, maior o desgaste. Da mesma forma, quanto menor a aproximação entre estas ferramentas (maior a cota L), menor a solicitação nas matrizes de recorte, menor o desgaste. Porém, nesta situação, ocorre a sobrecarga de outras ferramentas do conjunto. Desta forma, existe uma condição de equilíbrio na distribuição dos esforços na regulação das matrizes de recorte que pode ter variado durante este acompanhamento industrial.

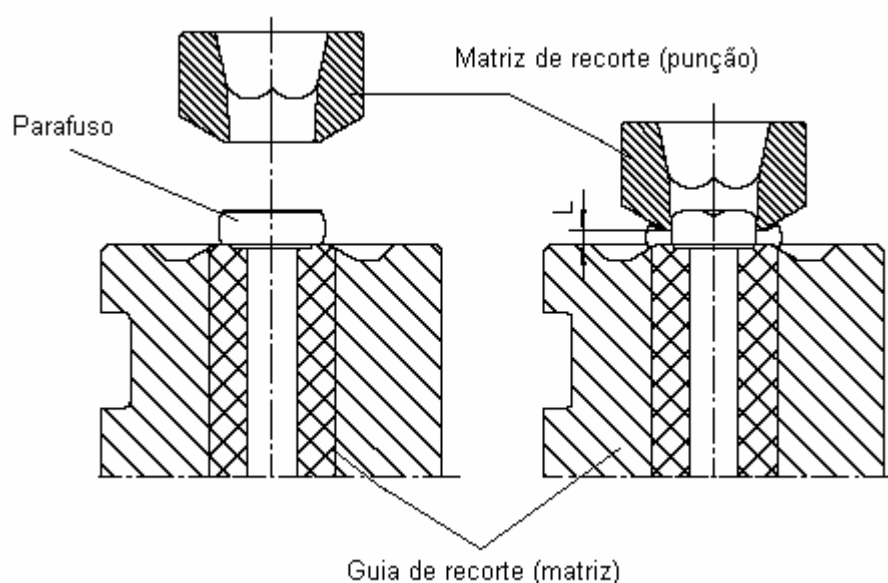


Figura 4.35 – Representação esquemática da operação de recorte do sextavado, destacando o afastamento entre punção e matriz.

Analizando as taxas de desgaste apresentadas na Tabela 4.13, percebe-se que o aço SAE 1038 proporcionou um desgaste, tanto das camadas de revestimentos quanto do substrato, maior que o aço SAE 1015. Este resultado era esperado, tendo em vista a maior resistência mecânica do aço SAE 1038, conforme Tabela 4.1, devido principalmente ao maior teor de carbono em sua composição química.

As Figuras 4.36 a 4.38 mostram comparações entre as curvas de desgaste das matrizes de recorte durante a conformação dos aços SAE 1015 e 1038, para cada um dos revestimentos. Conforme os valores da Tabela 4.13, para o nitreto de titânio, a diferença na vida das matrizes de recorte utilizadas para conformar o aço SAE 1015 em relação ao aço SAE 1038 foi de 47%, considerando o número médio de peças produzidas. No caso do nitreto de cromo, esta diferença foi de 43%, enquanto que para o carbonitreto de titânio a diferença foi de 31%.

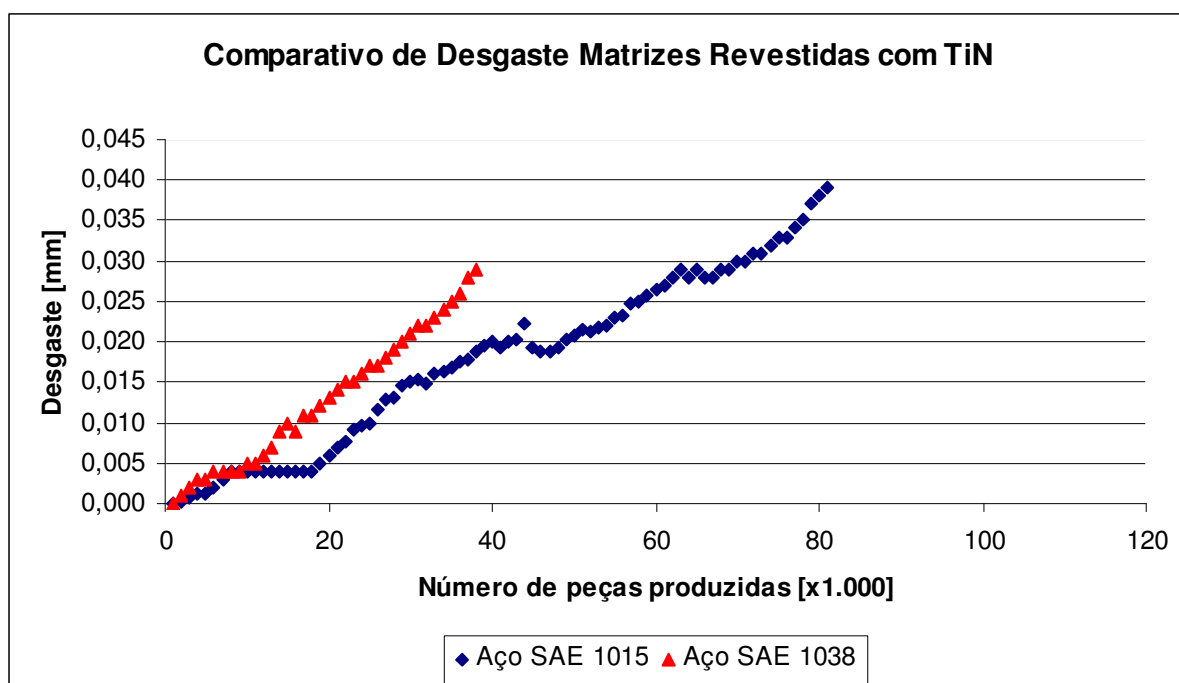


Figura 4.36 – Comparativo de desgaste das matrizes de recorte revestidas com nitreto de titânio para os aços SAE 1015 e SAE 1038.

Acredita-se que a menor diferença na comparação da vida das matrizes revestidas com carbonitreto de titânio para os aços SAE 1015 e SAE 1038, deve-se principalmente a

maior dureza superficial deste revestimento, tornando-o menos susceptível à variação na composição química dos aços analisados e, conseqüentemente, mais resistente ao desgaste.

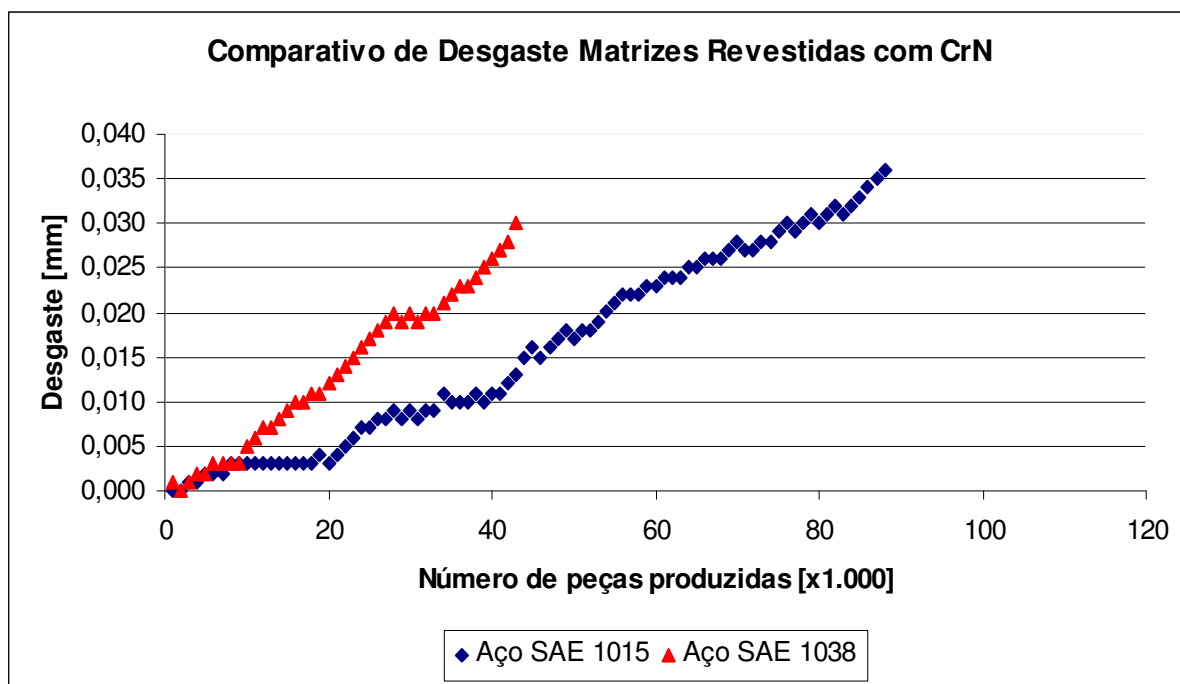


Figura 4.37 – Comparativo de desgaste das matrizes de recorte revestidas com nitreto de cromo para os aços SAE 1015 e SAE 1038.

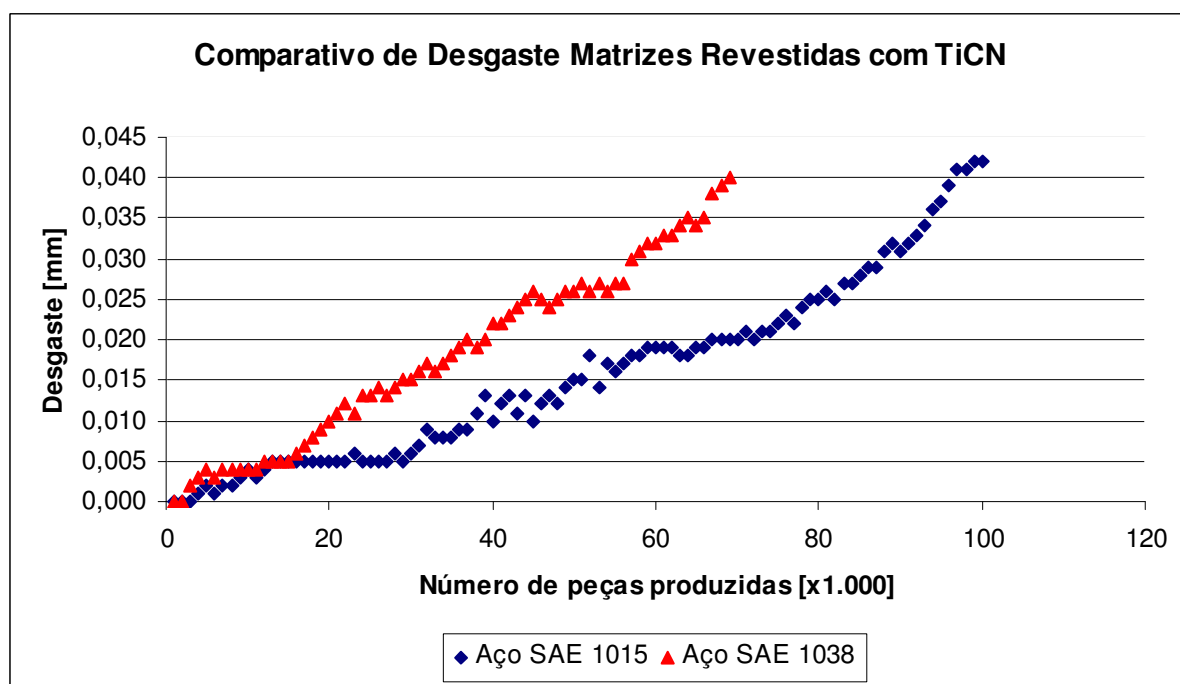


Figura 4.38 – Comparativo de desgaste das matrizes de recorte revestidas com carbonitreto de titânio para os aços SAE 1015 e SAE 1038.

Convém ressaltar ainda, analisando estas mesmas figuras, a presença dos patamares com valores constantes nas curvas de desgaste das matrizes utilizadas na conformação do aço SAE 1015. Nas curvas de desgaste para o aço SAE 1038, conforme mencionado na seção 4.8.2, estes patamares são extremamente curtos, evidenciando um desgaste mais acelerado das camadas de revestimento, dada a maior abrasividade deste aço.

Independentemente do tipo de aço conformado, as matrizes de recorte revestidas com carbonitreto de titânio apresentaram os melhores desempenhos. Estas comparações são apresentadas nas Figuras 4.39 e 4.40.

Para o aço SAE 1015, Figura 4.39, o número médio de peças produzidas com as matrizes revestidas com carbonitreto de titânio foi de 84.333 peças. Este valor corresponde a um acréscimo de 25% na vida das ferramentas em relação ao nitreto de titânio, com média de 63.333 peças produzidas, e 13% quando comparado às ferramentas revestidas com nitreto de cromo, com média de 73.000 peças produzidas.

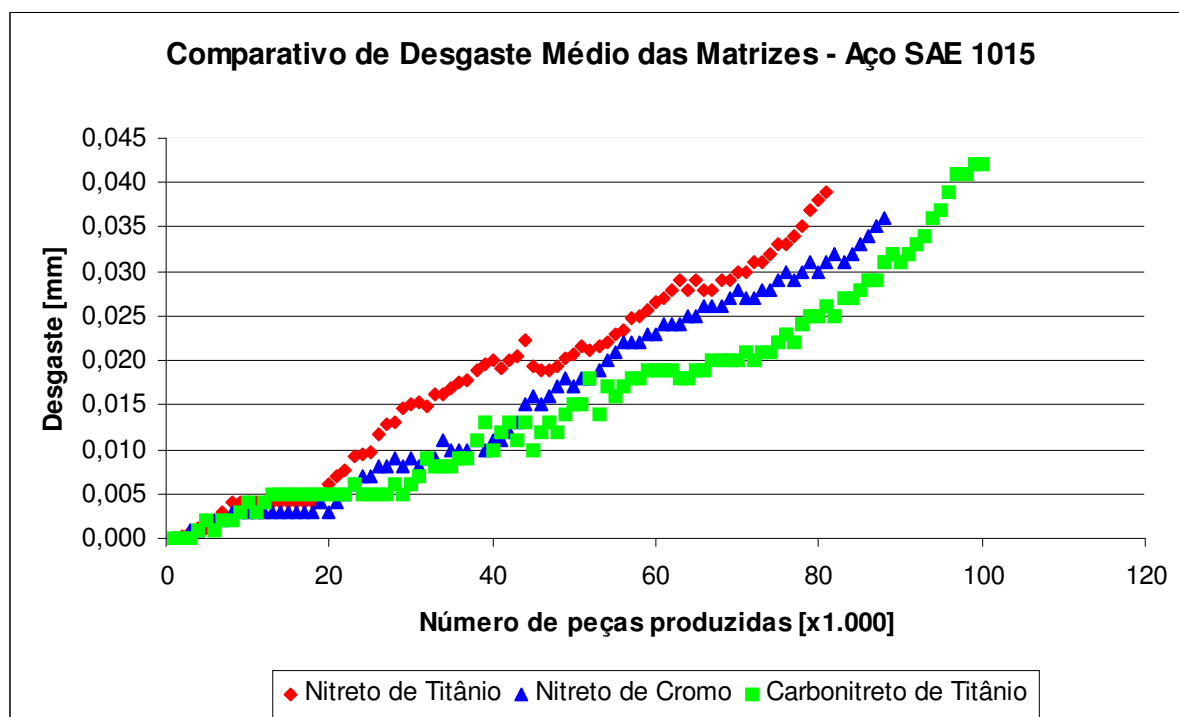


Figura 4.39 – Comparativo de desgaste das matrizes de recorte revestidas com nitreto de titânio, nitreto de cromo e carbonitreto de titânio para o aço SAE 1015.

Na comparação de vida das matrizes de recorte para o aço SAE 1038, apresentada na Figura 4.40, as ferramentas revestidas com carbonitreto de titânio produziram em média 58.000 peças, 42% a mais que o nitreto de titânio, com 33.666 peças produzidas, e 29% a mais que o nitreto de cromo, com 41.333 peças produzidas.

Os resultados apresentados nesta seção validam os resultados obtidos com os ensaios de desgaste discutidos nas seções 4.6, para o ensaio de desgaste pino-sobre-disco, e 4.7, para o ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva. A classificação dos três revestimentos segundo seus desempenhos, obtida através dos ensaios laboratoriais, permaneceu inalterada após o acompanhamento industrial. A Tabela 4.14 apresenta um comparativo dos resultados obtidos nos ensaios de desgaste e no acompanhamento industrial. As comparações foram realizadas com base no carbonitreto de titânio, revestimento com melhor desempenho em todos os experimentos.

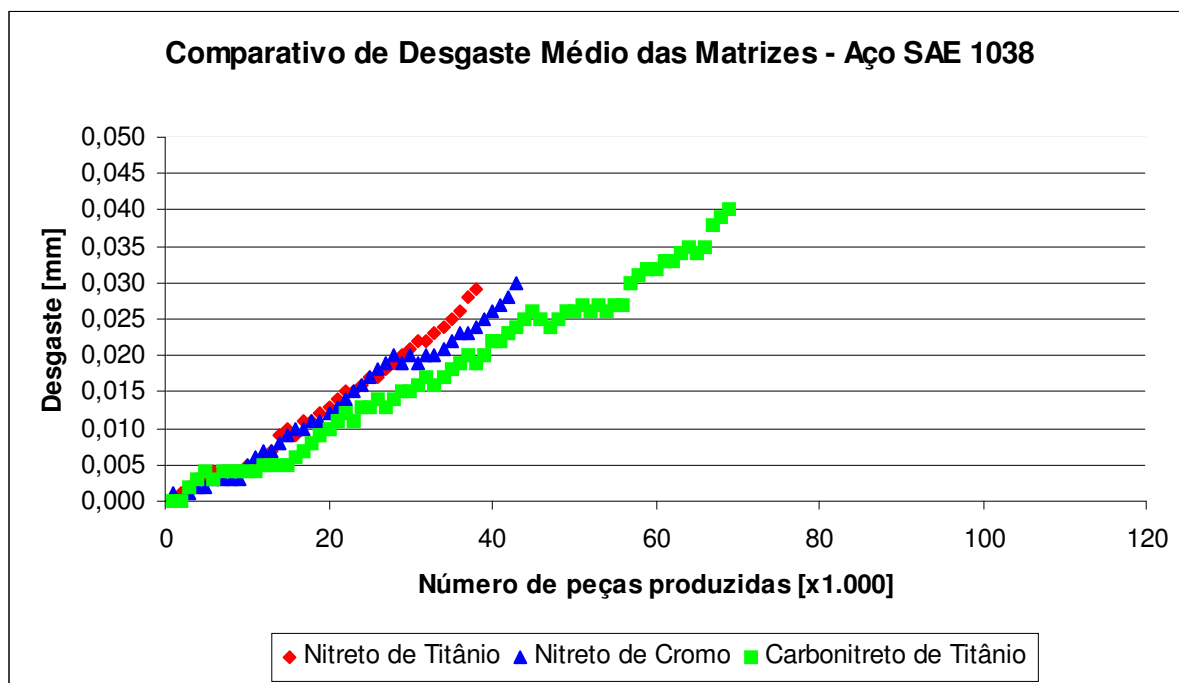


Figura 4.40 – Comparativo de desgaste das matrizes de recorte revestidas com nitreto de titânio, nitreto de cromo e carbonitreto de titânio para o aço SAE 1038.

Através da Tabela 4.14, percebe-se que não é possível estabelecer uma relação de proporcionalidade entre os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais e no acompanhamento industrial. Este fato se deve provavelmente aos diferentes níveis de desgaste a que foram submetidos os corpos de prova e as matrizes de recorte em seus respectivos experimentos, tendo como consequência, diferentes taxas de desgaste das camadas dos revestimentos.

A combinação de propriedades encontradas na camada de carbonitreto de titânio, tais como alta dureza, Figura 4.1 e Tabela 4.5, baixo coeficiente de atrito, Tabela 3.2, e espessura de camada uniforme, Figura 4.6, permitiu a este revestimento apresentar as menores taxas de desgaste, até a substituição da ferramenta. Estes resultados tornam o carbonitreto de titânio o revestimento mais adequado para operações de alta abrasividade e obtenção de um melhor desempenho em ferramentas com cantos vivos mecanicamente submetidos à tensão (DUROTIN, 2005).

Tabela 4.14 – Comparativo dos resultados obtidos nos ensaios de desgaste e no acompanhamento industrial.

Revestimento	Perda de Volume no Ensaio de Desgaste Pino-sobre-Disco [mm³]	Perda de Volume no Ensaio de Desgaste Disco de Borracha-Areia Abrasiva [mm³]	Vida Média das Matrizes de Recorte na Conformação do Aço SAE 1015 [peças]	Vida Média das Matrizes de Recorte na Conformação do Aço SAE 1038 [peças]
Carbonitreto de Titânio	0,1083	13,9150	84.333	58.000
Nitreto de Cromo	0,1465	16,2080	73.000	41.333
Varição em Relação ao Carbonitreto de Titânio	Desgaste 35% maior	Desgaste 16% maior	Rendimento 13% menor	Rendimento 29% menor
Nitreto de Titânio	0,5032	21,0318	63.333	33.666
Varição em Relação ao Carbonitreto de Titânio	Desgaste 3,6 vezes maior	Desgaste 51% maior	Rendimento 25% menor	Rendimento 42% menor
Varição em Relação ao Nitreto de Cromo	Desgaste 2,4 vezes maior	Desgaste 30% maior	Rendimento 13% menor	Rendimento 18% menor

O nitreto de cromo constitui-se um bom substituto para o nitreto de titânio, o revestimento mais difundido e utilizado na indústria. Os resultados apresentados neste trabalho confirmam os estudos de Su; Yao; Wu (1996), Wilson *et al* (1993) e Aubert; Gillet; Gaucher; Terrat (1983), que destacaram o melhor desempenho em aplicações industriais deste revestimento em relação ao nitreto de titânio.

5 CONCLUSÕES

Analizando os resultados experimentais obtidos, algumas conclusões podem ser apresentadas com relação às propriedades dos revestimentos e sua importância no aumento da resistência ao desgaste dos materiais.

O revestimento de carbonitreto de titânio proporcionou excelente desempenho em todas as avaliações de desgaste realizadas, tanto a nível laboratorial quanto industrial. No acompanhamento das matrizes de recorte, proporcionou a maior vida média para os dois tipos de aços carbono conformados. A dureza superficial da camada, 30% superior aos outros dois revestimentos, e o baixo coeficiente de atrito deste revestimento foram propriedades fundamentais para o desempenho superior.

Já o revestimento de nitreto de cromo teve um desempenho intermediário, inferior ao do carbonitreto de titânio e superior ao do nitreto de titânio, tornando-se uma opção de substituição para este último em condições de abrasividade não muito severas. Seu desempenho superior em relação ao nitreto de titânio também está, provavelmente, associado ao menor coeficiente de atrito e maior dureza superficial da camada.

O ensaio de microdureza possibilitou avaliar os altos níveis de dureza superficial atingidos com a aplicação dos revestimentos. Através dos ensaios realizados, pode-se comprovar a importância desta propriedade na resistência ao desgaste abrasivo, tendo em vista que os revestimentos com maior dureza superficial apresentaram os melhores desempenhos.

A adesividade de camada ao substrato não foi uma propriedade importante para classificação dos revestimentos com relação à resistência ao desgaste. A condição de adesividade de camada dos três revestimentos estudados foi satisfatória para os níveis de

desgaste abrasivo as quais estas foram submetidas. Portanto, não há correlação entre a adesividade de camada (avaliada através da indentação) e a resistência ao desgaste.

As análises microestruturais possibilitaram a avaliação da espessura das camadas de revestimentos aplicadas sobre o substrato dos corpos de prova e das ferramentas. A definição da espessura de camada média foi uma importante referência para a divisão das curvas de desgaste obtidas através do acompanhamento em escala industrial entre desgaste da camada de revestimento e desgaste do substrato. Entretanto, comprovou-se que a maior espessura de camada nem sempre significa a garantia de uma maior vida em serviço de um revestimento, tendo em vista que os resultados do nitreto de cromo foram, em todas as análises, superiores aos do nitreto de titânio, apesar da menor espessura de camada.

Os ensaios de desgaste permitiram avaliar e classificar o comportamento tribológico dos três revestimentos analisados neste estudo. Os resultados obtidos nestes ensaios realizados em laboratório, do ponto de vista qualitativo, puderam ser extrapolados para o acompanhamento industrial, tendo em vista a coerência nos resultados destas avaliações.

Independentemente do tipo de revestimento, o aço SAE 1038 provocou um desgaste mais acelerado das matrizes de recorte do que o aço SAE 1015. Em média, o desgaste das ferramentas na conformação do aço SAE 1038 foi 40% maior. Este resultado deve-se ao maior teor do elemento carbono na composição química, conseqüentemente maior resistência mecânica, do aço SAE 1038.

6 SUGESTÕES

Apresentam-se como sugestões para trabalhos futuros:

- A avaliação de outros tipos de revestimentos, compostos por multicamadas, por exemplo, visando melhorar o desempenho obtido com o carbonitreto de titânio;
- A realização de outros ensaios de desgaste, com os mesmos materiais e revestimentos, visando estabelecer uma correlação entre os resultados de desgaste dos ensaios laboratoriais e do acompanhamento industrial;
- Estudar a transição entre o desgaste das camadas de revestimentos e do substrato, através de avaliações com o microscópio eletrônico de varredura durante a realização dos ensaios.

7 REFERÊNCIAS

AHMED, N. A. G. **Ion plating technology: developments and applications**. New York: John Wiley & Sons, 1987.

ASME-Report. **Strategy for energy conservation through tribology**. New York: ASME Publications Department, 1977.

ASTM G 65. **Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus**. Philadelphia, 1991.

ASTM G 99. **Standard test method for wear with a pin-on-disk apparatus**. Philadelphia, 1995.

AUBERT, A.; GILLET, R.; GAUCHER, A.; TERRAT, J.P. Hard chrome coatings deposited by physical vapour deposition. **Thin Solid Films**, [S.I.], n. 108, p. 165-172, 1983.

BAYER, R. G. **Wear Testing**. In: **ASTM Handbook: Mechanical Testing**. 9th ed. [S.I.: s.n.], 1985. v. 8.

BENDER, D.; MUMME, F. Capas innovadoras de material duro para herramientas en la conformación masiva en frío. **Alambre**, [S.I.], n. 2-3, p. 46-49, 2005.

BHUSHAN, B.; GUPTA, B.K. **Handbook of tribology: materials, coatings and surface treatments**. New York: McGraw-Hill, 1991.

BMFT-Report. **Tribologie, reibung-verschleiß- schmierung**. Bonn: BMFT-Forschungsbericht, 1976.

BOWDEN, F. P.; TABOR, D. Mechanism of metallic friction. **Nature**, [S.I.], n. 150, p. 197-199, 1942.

BOWDEN, F. P.; TABOR, D. **The friction and lubrication of solids**. Oxford: Clarendon Press, 1950.

BOWDEN, F. P.; TABOR, D. **The friction and lubrication of solids: part II**. Oxford: Clarendon Press, 1964. cap. XXIV.

BRANKOVIC, M. **Wear Mechanisms**. In: LABORATOIRE de Tribologie et Dynamique dès Systèmes, Ecole Centrale de Lyon, Lyon, 1998. Disponível em: <<http://servers.ec-lyon.fr/tribologie/HTML/english/mechanisms.html>>. Acesso em: 28 mar. 2005.

BRESSAN, J. D.; HESSE, R.; SILVA JR., E. M. Abrasive wear behavior of high speed steel and hard metal coated with TiAlN e TiCN. **Wear**, [S.I.], v. 250, p. 561-568, 2001.

BURWELL, J. T.; STRANG, C. D. On the empirical law of adhesive wear. **J. Appl. Phys.**, [S.I.], n. 23, p. 18-28, 1952.

CAMPOS JR., W. M. Mecanismos de proteção contra desgaste e aumento de confiabilidade de processo: importantes avanços da tecnologia de tratamento de superfícies. In: CONGRESSO de Corte e Conformação de Metais, 2001, São Paulo. **Resumos...** São Paulo: Aranda, 2001.

CISER Parafusos e Porcas. **Análise de matrizes de estampagem de porcas sextavadas.** Ciser Parafusos e Porcas: relatório de análise. Joinville, 2005.

CISER Parafusos e Porcas. **Rendimento de matrizes de recorte em prensas progressivas.** Ciser Parafusos e Porcas: relatório de análise. Joinville, 2006.

DA SILVA, W. S. **Estudo da tenacidade à fratura do aço rápido M2 fundido, modificado e tratado termicamente.** 2001. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-21072006-102226>>. Acesso em: 12 out. 2006.

DAL COMUNI, J. F.; FAGUNDES, T. A. **Estudo do desgaste dos revestimentos em pinos.** 2004. Trabalho de conclusão de curso - Instituto Superior Tupy, Sociedade de Ensino Superior de Santa Catarina, Joinville.

DE MELLO, J. D. B. **Introdução ao estudo do desgaste.** Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia: [s.n.], 1994. p. 1-26.

DESGASTE e tribologia. BALZERS: aplicações. Disponível em: <<http://www.balzers.com.br/bbr/por/02-applications/01-wear-tribology/indexW3DnavidW263.php>>. Acesso em: 02 abr. 2005.

DIN 50320. **Verschleiß - Begriffe, Analyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes.** Berlin, 1979.

DIN EN 10.002-1. **Metallic materials – tensile testing – part 1: method of testing at ambient temperature.** Switzerland, 1990.

DOWSON, D. **History of Tribology.** [S.I.]: Professional Engineering Publishing, 1997.

DUROTIN. BRASIMET: propriedades dos revestimentos superficiais. Disponível em: <<http://www.brasimet.com.br/durotin/tipos.asp>>. Acesso em: 15 jul. 2004.

DUROTIN. BRASIMET: revestimentos superficiais. Disponível em: <<http://www.brasimet.com.br/durotin/default.asp>>. Acesso em: 02 abr. 2005.

EKBERG, A. **Wear:** some notes. Chalmers University of Technology. [S.I.: s.n.], 1997.

FLOM, D. G.; PORILE, N. T. Effect of temperature and high speed sliding on the friction of teflon on teflon. **Nature**, [S.I.], n. 175, p. 682, 1955.

GODFREY, D. Diagnosis of wear mechanisms. In: PETERSON, M. B.; WINER, W. O., **Wear control handbook.** New York: ASME Publications Department, 1980. p. 283-311.

GOODZEIT, C. L.; HUNNICUTT, R. P.; ROACH, A. E. Frictional characteristics and surface damage of thirty-nine different elemental metals in sliding contact with iron. **Trans. ASME**, [S.I.], v. 78, p. 1669-1676, 1956.

HABIG, K. H. Der einfluß der gegenseitigen löslichkeit von metallen auf einige ihrer tribologischen eigenschaften. **Metall-oberfläche**, [S.I.], v. 24, p.375-379, 1970.

HEINKE *et al.* Evaluation of PVD nitride coatings, using impact, scratch and Rockwell-C adhesion tests. **Thin Solid Films**, [S.I.], n. 270, p. 431-438, 1995.

HOKKIRIGAWA, K. *et al.* Experimental and theoretical analysis of wear mechanisms of metals in tilted block on plate type sliding wear. **Wear**, [S.I.], v. 214, p. 192-201, 1998.

HOYLE, G. **High Speed Steels**. Cambridge: Butterworth, 1988.

HULTMAN, L.; SUNDGREN, J. E. In.: **HANDBOOK of hard coatings**: deposition technologies, properties and applications. New Jersey: Bunshaw, 2001.

ISO 6508-1. **Metallic materials – Rockwell hardness test – Test method (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)**. Switzerland, 1999.

JAHANMIR, S. On the wear mechanisms and the wear equations. In: SUH, N. P.; SAKA, N. **Fundamentals of tribology**. Cambridge: The Mit Press Editors, 1980. p. 455-467.

JOST, H. P. **Lubrication**: a report of the present position and industry's needs. London: [s.n.], 1966.

JOST, H. P.; SCHOFIELD, J. Energy saving through tribology: a techno-economic study. **James Clayton Lecture**, London, v. 195, n. 16, 1981.

KINLOCH, A. J. The science of adhesion. **J. Mater. Sci.**, [S.I.], v. 15, p. 2141-2166, 1980.

KIRK, J. A. **High Speed Steel Technology and Tool Steels**. International Conference on Towards Improved Performance of Tool Materials. Teddington, 1981, Proceedings...London. Metals Society, 1982, p. 45-51.

LUDEMA, K. C. Friction. In:_____. **CRC Handbook of Lubrication**. [S.I.]: CRC Press, 1988. v. II.

LUDEMA, K. C. **Friction, wear, lubrication**: a textbook in tribology. [S.I.]: CRC Press, 1996.

MARU, M. M. **Estudo do desgaste e atrito de um par metálico sob deslizamento lubrificado**. 2003. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3132/tde-07052005-130638>>. Acesso em: 05 mar. 2005.

MATAMOROS, E. P. **Modelo de desgaste oxidativo baseado em parâmetros termodinâmicos**. 2004. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo,

São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3132/tde-30042004-180341/>>. Acesso em: 06 jun. 2005.

MENDANHA, A.; GOLDENSTEIN, H.; PINEDO, C. E. Tenacidade do aço ferramenta para trabalho a frio AISI D2 – Parte I: Influência da microestrutura de partida. In: 1º Encontro de integrantes da cadeia produtiva de ferramentas, moldes e matrizes, 2003, São Paulo. **Resumos...**São Paulo: [S.I.], 2003.

NBR NM 202. **Arames de aço, redondos, de qualidade especial, para forjamento a frio de parafusos, porcas, rebites e correlatos.** Brasil, 2000.

NORDIN, M.; LARSSON, M.; HOGMARK, S. Mechanical and tribological properties of multilayered PVD TiN/CrN. **Wear**, [S.I.], v. 232, p. 221-225, 1999.

PADRÃO DE PRODUÇÃO 547/2. **Desenho de produção interno Ciser Parafusos e Porcas.** Joinville, 2005.

PASCHOAL, A. L. **Avaliação da resistência à corrosão em meio fisiológico de metais revestidos com nítreto de titânio.** 1998. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-02072003-093007/>>. Acesso em: 06 jun. 2005.

PETERSON, M. B. **Wear control handbook.** New York: ASME Publications Department, 1980.

PINEDO, C. E. Tratamentos superficiais para aplicações tribológicas. **Metalurgia & Materiais**, v. 60, n. 543, p. 162, 2004.

REIS, M. C.; ZAVAGLIA, C. A. C. Projeto e construção de um equipamento para ensaios de desgaste de materiais para uso em próteses ortopédicas. **Revista Brasileira de Biomédica**, São Paulo, v. 15, n. 1-2, p. 31-38, 1999.

RICE, S. L. A review of wear mechanisms and related topics. [S.I.: s.n.], 1980. p. 469-476.

SAE J403. **Chemical Compositions of SAE Carbon Steels.** Warrendale, 1995.

SCOTT, D. **Introduction to tribology.** In: SUH, N. P.; SAKA, N. Fundamentals of tribology. Cambridge: The Mit Press Editors, 1980. p. 1-11.

SERBINO, E. M. **Um estudo dos mecanismos de desgaste em disco de freio automotivo ventilado de ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar.** 2005. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-12052005-093850/>>. Acesso em: 06 jun. 2005.

SIKORSKI, M. E. The adhesion of metals and factors that influence it. **Wear**, [S.I.], v. 7, p. 114-162, 1964.

SINATORA, A. **Metalurgia & Materiais**, v. 53, n. 469, p. 548-550, 1997.

SINATORA, A.; TSCHIPTSCHIN, A. P. Propriedade de superfície de filmes e camadas. **Metalurgia & Materiais**, v. 60, n. 543, p. 164-166, 2004.

STRAFFORD, K.N. Tribological properties of coatings: expectations, performance e design dilema. **Surface and Coatings Technology**, [S.I.], v. 81, p. 106-117, 1996.

STROKES, J. T. Surface engineering and wear. In: _____. **The theory and application of the HVOF thermal spray process**. Ireland: Book in Print, 2003. cap. 1. Disponível em: <<http://webpages.dcu.ie/~strokesjt/ThermalSpraying/HVOFThermalSpraying/Book/Chapter1.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2006.

SU, Y.L.; YAO, S.H. On the performance and application of CrN coatings. **Wear**, [S.I.], v. 205, p. 112-119, 1997.

SU, Y.L.; YAO, S.H.; WU, C.T. Comparisons of characterizations and tribological performance of TiN and CrN deposited by cathodic arc plasma deposition process. **Wear**, [S.I.], v. 199, p. 132-141, 1996.

SU, Y.L. *et al.* Comparison of tribological behavior of three films – TiN, TiCN and CrN – grown by physical vapor deposition. **Wear**, [S.I.], v. 213, p. 165-174, 1997.

SUSKI, C. A. **Estudo do efeito de tratamentos e revestimentos superficiais na vida de ferramentas de conformação mecânica a frio**. 2004. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

TOMANIK, E. **Modelamento do desgaste por deslizamento em anéis de pistão de motores de combustão interna**. 2000. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3132/tde-08122004-203125/>>. Acesso em: 06 jun. 2005.

TRATAMENTO térmico. BRASIMET: tratamento térmico. Disponível em: <<http://www.brasimet.com.br/tt/default.asp>>. Acesso em: 02 abr. 2005.

TSCHIPTSCHIN, A. P. Relação estrutura-propriedades em recobrimentos duros. **Metalurgia & Materiais**, v. 60, n. 543, p. 167-169, 2004.

VIJH, A. K. The influence of metal-metal bond energies on the adhesion, hardness, friction and wear of metals. **J. Mater. Sci.**, [S.I.], v. 10, p. 998-1004, 1975.

VILLARES METALS. Catálogo técnico sobre aços ferramenta. São Paulo, 2003.

WAHL, H. Verschleißprobleme im braunkohlenbergbau. **Braunkohle, Wärme und Energie**, [S.I.], n. 5/6, p. 75-87, 1951.

WELLINGER, K.; UETZ, H. Gleitverschleiß, spülverschleiß, strahlverschleiß unter der wirkung von körnigen stoffen. **VDI-Forschungsheft 449B**, [S.I.], bd. 21, 1955.

WICK, C., VEILLEUX, R. F. Vapour deposition processes. In: **TOOL and manufacturing engineers handbook**. 4th ed. [S.I.: s.n.], 1986. v. 3.

WILSON, A. *et al.* A comparison of the wear and fatigue properties of plasma-assisted physical vapour deposition TiN, CrN and duplex coatings on Ti-6Al-4V. **Surface and Coatings Technology**, [S.I.], v. 62, p. 600-607, 1993.

ZEGHNI, A. E.; HASHMI, M. S. J. Comparative wear characteristics of TiN and TiC coated and uncoated tool steel. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. I.], n. 155-156, p. 1923-1926, 2004.

ZUM GAHR, K.-H. **Microstructure and wear of materials**. Amsterdam: Elsevier, 1987. v.1, p. 1-6, 80-115.

8 APÊNDICE A

8.1 Cálculo das Tensões no Ensaio de Desgaste Disco de Borracha-Areia Abrasiva

A tensão σ_{DB} atuante sobre os corpos de prova durante a realização do ensaio de desgaste disco de borracha-areia abrasiva foi calculada através da Equação 8.1.

Seguindo as especificações da norma ASTM G65 (1991), a força F_{DB} empregada sobre os corpos de prova durante a realização do ensaio foi de 130 N. A área de contato A_{DB} , entre o disco de borracha e os corpos de prova, foi avaliada através da medição da área desgastada. A área de contato A_{DB} encontrada foi de $272 \pm 12 \text{ mm}^2$.

$$\sigma_{DB} = \frac{F_{DB}}{A_{DB}} \quad (8.1)$$

$$\sigma_{DB} = 0,50 \pm 0,03 \text{ MPa}$$

8.2 Cálculo das Tensões no Ensaio de Desgaste Pino-sobre-Disco

A tensão σ_{PD} atuante sobre os corpos de prova durante a realização do ensaio de desgaste pino-sobre-disco foi calculada através da Equação 8.2.

Conforme apresentado no Capítulo 3, seção 3.2.7, a força F_{PD} empregada sobre os corpos de prova durante a realização do ensaio foi de 20 N. A área de contato A_{PD} , entre os corpos de prova, foi avaliada através da medição da área desgastada do pino. A área de contato A_{PD} encontrada foi de $3,15 \pm 0,10 \text{ mm}^2$.

$$\sigma_{PD} = \frac{F_{PD}}{A_{PD}} \quad (8.2)$$

$$\sigma_{PD} = 6,3 \pm 0,3 \text{ MPa}$$

8.3 Cálculo das Tensões de Conformação no Recorte do Sextavado

A força necessária para o processo de recorte da cabeça do parafuso sextavado F , cuja sequência de conformação é apresentada na Figura 8.1, é calculada através da equação abaixo (NEDSCHROEF HERENTALS, 1998):

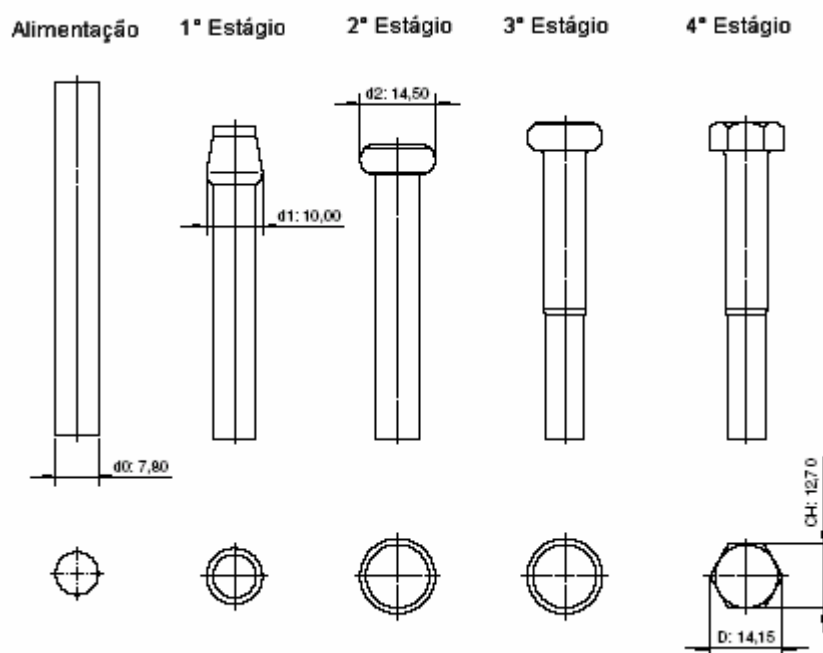


Figura 8.1 – Representação esquemática da sequência de conformação de um parafuso sextavado (PADRÃO DE PRODUÇÃO 547/2, 2005).

$$F = \frac{(A_2 - A_{CH})}{1.000} \cdot Kf_2 \quad (8.3)$$

onde:

A_2 : Área da cabeça cilíndrica, antes da operação de recorte, em mm^2 .

A_{CH} : Área da cabeça sextavada, após o recorte, em mm^2 .

Kf_2 : Tensão de deformação no 2º estágio, em MPa, calculada pela equação:

$$Kf_2 = Kf_{100} \cdot \rho_2^n \quad (8.4)$$

onde:

Kf_{100} : Tensão de deformação para $\rho=1$, em MPa.

n : Expoente de encruamento do material.

ρ_2 : Grau de deformação logarítmica após o 2ª estágio de conformação, calculada pela equação:

$$\rho_2 = \rho_h^2 + \rho_h^1 + \rho_0 \quad (8.5)$$

onde:

ρ_h^1 : Grau de deformação logarítmica durante o 1ª estágio de conformação.

ρ_h^2 : Grau de deformação logarítmica durante o 2ª estágio de conformação.

ρ_0 : Grau de deformação logarítmica devido ao processo de trefilação do arame.

Os valores de ρ_h^1 e ρ_h^2 são calculados através da Equação 8.6, enquanto o valor de ρ_0

é obtido através da Equação 8.7:

$$\rho_h^x = \ln \left(\frac{d_x - 1}{d_x} \right)^2 \quad (8.6)$$

$$Kf_{100} = \frac{R_m}{e^{\rho_0}} \cdot \left(\frac{e}{n} \right)^n \quad (8.7)$$

onde:

R_m : Limite de resistência, em MPa.

A Tabela 8.1 (NEDSCHROEF HERENTALS, 1998) apresenta as propriedades mecânicas dos aços SAE 1015 e SAE 1038 que serão utilizadas no cálculo das tensões de conformação.

Tabela 8.1 – Propriedades mecânicas dos aços SAE 1015 e SAE 1038 utilizadas no cálculo das tensões de conformação (NEDSCHROEF HERENTALS, 1998).

Propriedades Mecânicas	SAE 1015	SAE 1038
Limite de resistência, R_m (MPa)	420	510
Tensão de deformação para $\rho=1$, Kf_{100} (MPa)	700	850
Expoente de encruamento do material, n	0,22	0,19

Através da Equação 8.7 e das propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 8.1, obtém-se o valor de ρ_0 para o SAE 1015 e SAE 1038:

$$\rho_0^{1015} = 0,042 \quad \text{e} \quad \rho_0^{1038} = 0,005$$

Como os valores de ρ_h não dependem das propriedades do material conformado, os cálculos de ρ_h^1 e ρ_h^2 realizados através da Equação 8.6, com base nas informações da Figura 8.1, valem tanto para o aço SAE 1015 quanto para o aço SAE 1038.

$$\rho_h^1 = 0,50 \quad \text{e} \quad \rho_h^2 = 0,75$$

Com os valores de ρ_h^1 , ρ_h^2 e ρ_0 calculados, através da Equação 8.5, determina-se o valor de ρ_2 , para os dois aços conformados.

$$\rho_2^{1015} = 1,292 \quad \text{e} \quad \rho_2^{1038} = 1,255$$

Através da Equação 8.4, utilizando os valores de Kf_{100} apresentados na Tabela 8.1, obtém-se os valores de Kf_2 .

$$Kf_2^{1015} = 740,6MPa \quad \text{e} \quad Kf_2^{1038} = 887,5MPa$$

Utilizando-se a Equação 8.3, determina-se a força de conformação F necessária para o recorte da cabeça sextavada dos parafusos.

$$A_2 = \frac{\pi.d_2^2}{4} \therefore A_2 = 165,1mm^2$$

$$A_{CH} = \frac{2,598.D^2}{4} \therefore A_{CH} = 130,1mm^2$$

$$F^{1015} = 26kN \quad \text{e} \quad F^{1038} = 31kN$$

Determinadas as forças de conformação, as tensões de conformação σ_{DE} atuantes nas ferramentas podem ser calculadas. A área de contato A_{DE} entre a matriz de recorte e o material conformado foi de $36,7 \pm 2,5 \text{ mm}^2$. Desta forma, as tensões de conformação atuantes sobre as ferramentas foram determinadas através da Equação 8.8.

$$\sigma_{DE} = \frac{F}{A_{DE}} \quad (8.8)$$

$$\sigma_{DE}^{1015} = 712 \pm 69 \text{ MPa} \quad \text{e} \quad \sigma_{DE}^{1038} = 849 \pm 82 \text{ MPa}$$

8.4 Cálculo das Tensões no Ensaio de Adesividade de Camada

As tensões σ_{AD} atuantes nos corpos de prova durante o ensaio de adesividade de camada foram calculadas através da Equação 8.9. Convém salientar porém que estas tensões não correspondem exatamente às tensões que produzem as trincas e deslocamentos de camada na interface entre revestimento e substrato. As tensões σ_{AD} são valores orientativos, visando estabelecer um comparativo entre os níveis de tensão a que os corpos de prova foram submetidos no ensaio de adesividade e os encontrados nos outros ensaios.

As forças F_{AD} aplicadas nos corpos de prova nesta avaliação, conforme o Capítulo 3, seção 3.2.4, foram de 15, 30 e 45 kgf (correspondentes a 147, 294 e 441 N). A área de contato A_{AD} , entre o penetrador e os corpos de prova, foi obtida através do cálculo da área da indentação formada pelo penetrador.

$$\sigma_{AD} = \frac{F}{A_{AD}} \quad (8.9)$$

Os resultados do cálculo das tensões σ_{AD} atuantes no ensaio de adesividade de camada são apresentados na Tabela 8.2 .

Tabela 8.2 – Resultados do cálculo das tensões σ_{AD} atuantes no ensaio de adesividade de camada.

Carga [N]	Área A_{AD} [mm ²]	Tensão σ_{AD} [Mpa]
147	0,040 ± 0,001	3.592 ± 128
294	0,179 ± 0,003	1.636 ± 28
441	0,345 ± 0,017	1.278 ± 63

8.5 Referências

ASTM G 65. **Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus**. Philadelphia, 1991.

NEDSCHROEF HERENTALS. **Designer's Manual**. Belgium: [S. I.], 1998.

PADRÃO DE PRODUÇÃO 547/2. **Desenho de produção interno Ciser Parafusos e Porcas**. Joinville, 2005.